

M. BINI (\*), N. CASAROSA (\*\*), A. RIBOLINI (\*)

## L'EVOLUZIONE DIACRONICA DELLA LINEA DI RIVA DEL LITORALE PISANO (1938-2004) SULLA BASE DEL CONFRONTO DI IMMAGINI AEREE GEOREFERENZIALI

**Riassunto** - In questo lavoro è stata ricostruita la variazione della linea di riva dell'intero litorale pisano per il periodo 1938-2004 e sono state valutate quantitativamente le corrispondenti variazioni areali di spiaggia. Lo studio si è basato sull'analisi e georeferenziazione di oltre 340 fotogrammi con i quali sono stati ricostruiti 18 fotomosaici dell'intera area di studio, ciascuno corrispondente ad un diverso anno di osservazione. L'analisi di ogni fotomosaico ha consentito di individuare la posizione della linea di riva per ciascun anno considerato. Il fitto numero di dati ha permesso di valutare anche piccoli cambiamenti delle linee di riva non ancora documentati in letteratura e di estendere anche all'ultimo decennio i dati relativi alla variazione areale di spiaggia. I periodi caratterizzati da maggior erosione sono: l'intervallo temporale 1975-1990 per il tratto immediatamente a nord del Canale Scolmatore, quello 1938-1954 per il tratto compreso tra le foci dei fiumi Morto Nuovo e Serchio e quello 1938-1965 per il tratto a nord della foce dell'Arno (dove si raggiunge il massimo valore di perdita di superficie areale di spiaggia pari a  $1700 \times 10^3 \text{ m}^2$ ). Per l'intero periodo di osservazione risultano, invece, in avanzamento il tratto più settentrionale ed il più meridionale del litorale pisano. Il primo per l'effetto barriera esercitata dal porto di Viareggio nei confronti dei *drift* litoranei, il secondo per l'apporto sedimentario da spiagge immediatamente a nord. Nella zona di Tirrenia è stato evidenziata la presenza di una zona di equilibrio tra spiagge contigue in erosione e/o accrescimento (punto neutro). Per alcuni settori costieri è stata inoltre evidenziata una correlazione tra l'evoluzione della linea di riva e la costruzione o la modifica delle difese costiere. La costruzione della foce armata dell'Arno, ultimata nel 1926, ha determinato un forte incremento del processo erosivo nella zona delle «Lame delle Gelosie» (da 3 a 20 m/a di arretramento lineare), che ha registrato una diminuzione (1,5 m/a) solo nel periodo di creazione di un'apertura nel suo argine destro. Nel tratto meridionale della costa, la migrazione verso sud delle difese si accompagna con lo spostamento del punto neutro che porta a coinvolgere nei processi erosivi tratti di litorale sempre più prossimi al Canale Scolmatore. L'ampliamento del porto di Livorno (2001) ha causato l'erosione del tratto di costa nei pressi del Canale Scolmatore (fino a 18 m/a di arretramento lineare). Oltre a calcolare in dettaglio le variazioni della linea di riva per un periodo di 66 anni, i risultati di questo lavoro contribuiscono alla comprensione della mobilità dei sedimenti lungo il litorale pisano sia per causa naturali che antropiche.

**Parole chiave** - Linea di costa, erosione costiera, fotointerpretazione, litorale di Pisa.

**Abstract** - *Multitemporal (1938-2004) evolution of the Pisan shoreline based on the comparison of georeferenced aerial images.* This paper reconstructs the shoreline fluctuations in the Pisan littoral for the 1938-2004 period, and calculates the related loss and gain of beach areas. More than 340 aerial

images were used to build 18 photomosaics covering the entire study area for different years. The shoreline position was recognized on each photomosaic. The relatively dense number of data allowed to evaluate small shoreline shifting not yet documented in the literature, and to extend the calculation of the beach area variations also to the last decades. The most intense periods of erosion are: the 1975-1990 for the shore tract immediately north of Canale Scolmatore, the 1938-1954 for the shore tract between Fiume Morto Nuovo and Serchio River mouths, and the 1938-1965 for the tracts north of the Arno River mouth, where the maximum value of beach area loss is reached ( $1,700 \times 10^3 \text{ m}^2$ ). Conversely, the northernmost and southernmost tracts of the Pisan littoral result in advance during the whole period examined. To explain these trends, a barrier effect acted by the Viareggio harbour against along-shore drift and sediments supply from northern beaches can be claimed for the first and second tract respectively. In the area of the Tirrenia village, the presence of an equilibrium zone (neutral point) separating beaches in erosion and advancing was individuated. For some sectors, a correlation between shoreline evolution and building or modifications of coastal defences was documented. The construction of the defences system of the Arno river mouth, completed in 1926, caused a strong increase in the erosion of the «Lame delle Gelosie» area, i.e. from 3 to 20 m/yr of linear retreat. This retreat decreased to 1,5 m/yr when a hole was temporarily created in the right side of the defence. In the southern tract of the coast, the southward migration of coastal defences correlates with the shifting of the neutral point, that led to a progressive migration of the coastal sectors under erosion closer to the Canale Scolmatore. Finally, the enlargement of the Livorno harbour (2001) caused the erosion of the coastal tract adjacent to Canale Scolmatore, i.e. up to 18 m/yr of linear retreat. This work provides a detailed estimate of the shoreline fluctuations over a period of 66 years and in addition contributes to the understanding of the along-shore sediments mobility in the Pisan littoral both for natural and anthropogenic causes.

**Key words** - Shoreline, coastal erosion, remote sensing, Pisan littoral.

### INTRODUZIONE

La grave erosione che da oltre un secolo affligge la costa pisana spiega l'elevato numero di studi condotti in quest'area a partire dal lavoro pionieristico di Toniolo del 1910. Tra gli altri si segnalano alcuni lavori concentrati sugli aspetti sedimentologici delle spiagge (Saggini, 1967; Gandolfi & Paganelli, 1975; Baldini *et al.*, 1983; Cipriani *et al.*, 2001; Pranzini, 2004), alcuni sul ruolo delle caratteristiche meteomarine nell'erosione costie-

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, via S. Maria 53, 56126 Pisa (Italy). E-mail: bini@dst.unipi.it; ribolini@dst.unipi.it

(\*\*) Provincia di Pisa, Servizio Difesa del Suolo (Ufficio della costa). E-mail: n.casarosa@provincia.pisa.it

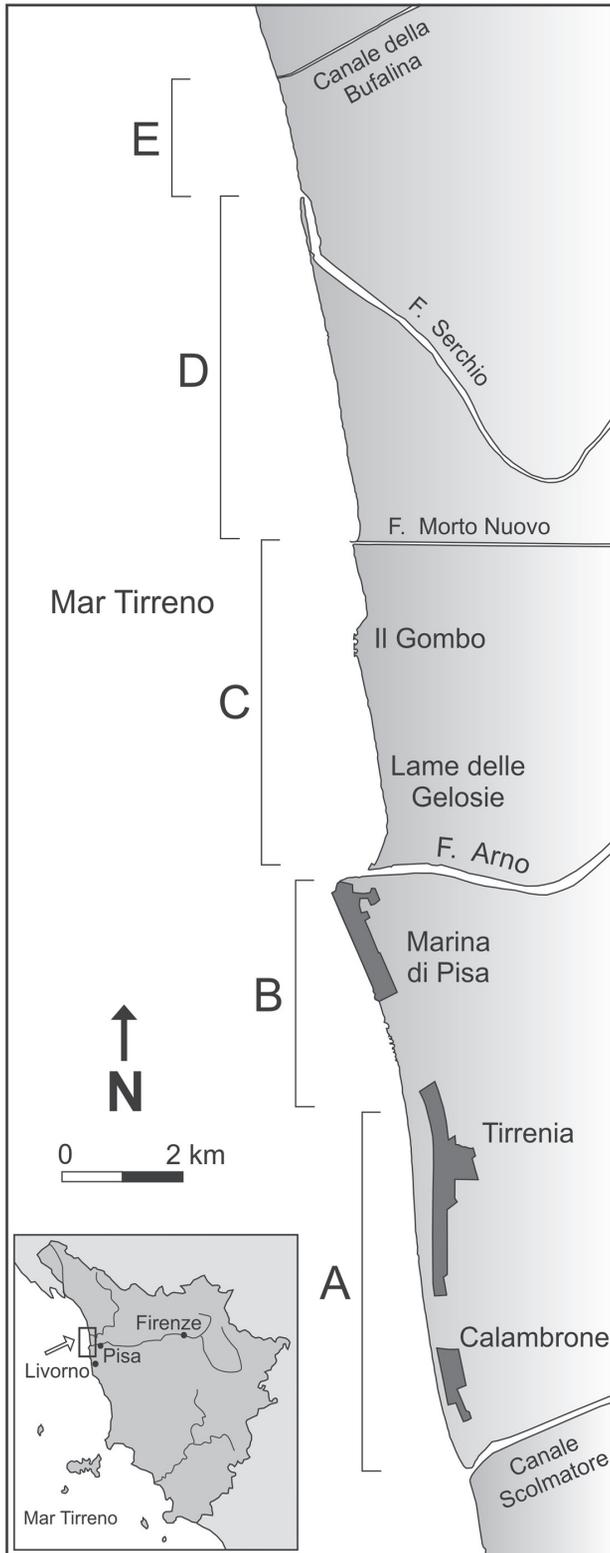


Fig. 1 - Il litorale di Pisa con la suddivisione nei cinque tratti di studio (A, B, C, D, E).

ra (Rapetti & Vittorini, 1974, 1978, 1983; Baldini & Rigattieri, 1983), ed altri sull'andamento della linea di riva all'interno della ricostruzione dell'evoluzione geomorfologica dell'intera pianura costiera (Della Rocca *et al.*, 1987, Federici & Mazzanti, 1993). Gli studi che hanno riguardato specificatamente la variazione delle linee di riva, sia con misure geodetiche che analisi di immagini aeree e documenti cartografici, sono quelli di Toniolo (1910, 1927), Albani (1940), Vittorini (1977), Federici (1983), Palla (1983a, 1983b, 1983c), Pranzini (1983, 2001, 2004, 2008), Noli & Franco (1989), Milano (1994) e Cipriani *et al.* (2001).

In questo lavoro ricostruiamo la variazione della linea di riva e le corrispondenti variazioni areali di spiaggia dell'intero litorale pisano per il periodo 1938-2004. L'indagine, basata su un fitto numero di osservazioni, ha consentito di valutare anche piccoli cambiamenti delle linee di riva non ancora documentate. Inoltre la disponibilità di immagini aeree recenti ha reso possibile considerare le variazioni della linea di riva nell'ultimo decennio. Avendo a disposizione una serie di dati cronologicamente densa, è stata tentata una correlazione tra l'evoluzione della linea di riva di alcuni settori e la costruzione e la modifica di difese costiere.

Gli scopi finali del lavoro sono quindi quelli di fornire un quadro aggiornato e quantitativo della tendenza all'erosione delle spiagge del litorale pisano e, allo stesso tempo, di contribuire alla comprensione dei fattori che ne regolano la variazione nel tempo e nello spazio sia per cause naturali che antropiche.

#### INQUADRAMENTO

Il litorale di Pisa si colloca nel tratto meridionale dell'unità fisiografica costiera della Toscana settentrionale tra Livorno e Bocca di Magra. I principali corsi d'acqua che alimentano con il loro apporto solido questo settore costiero sono i Fiumi Arno e Serchio. La foce dell'Arno divide il litorale in un tratto meridionale ed uno settentrionale, delimitati rispettivamente dal Canale Scolmatore e dal Canale della Bufalina (Fig. 1).

Alle spalle dei depositi di spiaggia attuale, la pianura costiera presenta una fitta successione di cordoni litoranei sormontati da dune (Federici & Mazzanti, 1993). Determinanti per l'evoluzione dell'area costiera sono l'andamento dei venti e l'ondazione. Il regime dei venti (Stazione meteorologica di S. Rossore) evidenzia una polarizzazione delle frequenze con massimi in corrispondenza delle direzioni del II quadrante ESE e SE. I venti più veloci appartengono invece al III quadrante, con massimi per le direzioni OSO e SO (Rapetti & Vittorini, 1978). I dati anemometrici sono in accordo con quelli relativi alla distribuzione delle altezze d'onda estraibili dall'archivio del Regio Servizio Meteorologico Olandese (K.N.M.I.): le mareggiate principali provengono dal settore 240-270N e da un ristretto settore centrato su 225N (Cipriani *et al.*, 2001).

A sud della foce dell'Arno, studi sulla composizione, provenienza e dispersione delle sabbie documentano un'alimentazione del tratto più meridionale del litorale sia da nord, proveniente dalle spiagge di Tirrenia, che da

sud dalle Secche delle Melorie, con eventuali contributi del Canale Scolmatore (Gandolfi & Paganelli, 1975). Il quadro di questi risultati sull'alimentazione sabbiosa configura un'evoluzione di tipo «relitta» delle spiagge del settore meridionale, che non sarebbero più alimentate dal delta dell'Arno ma dal rimaneggiamento di materiale già esistente lungo il litorale. È noto che la costruzione di briglie e invasi artificiali, la variazione nell'uso del suolo e l'escavazione di inerti nell'asta fluviale hanno drasticamente diminuito il trasporto solido dell'Arno. Misure dirette nel periodo 1936-1974 mostrano infatti una accentuata e continua fase decrescente del trasporto solido dell'Arno dal 1962 al 1974 (Milano, 1986).

Nel tratto a nord della foce dell'Arno, le ricerche meteorologiche condotte dagli anni '70 in poi, hanno evidenziato una direzione di trasporto dei materiali sabbiosi S-N, assicurata dal *drift* prossimale generato dai mari del III quadrante (Rapetti & Vittorini, 1978, 1983; Baldini & Rigattieri, 1983; Baldini *et al.*, 1983).

Gli abitati di Calambrone, Tirrenia e Marina di Pisa e le numerose infrastrutture turistiche conferiscono al litorale a sud della Foce dell'Arno un elevato grado di antropizzazione. Al contrario, il tratto a Nord della Foce dell'Arno mantiene discrete caratteristiche di naturalità.

Un elemento fisiografico ricorrente nella costa pisana è rappresentato dalle difese costiere, limitate nel tratto a nord della Foce dell'Arno, ma frequenti ed estese a sud di essa. Si tratta di scogliere aderenti/non aderenti, trasversali e parallele alla costa, emerse e soffolte e di armatura delle foci. La loro costruzione è iniziata negli anni '20 ed è continuata con fasi alterne e metodologie diverse fino ad oggi. In particolare nel 1926 viene ultimata la costruzione della foce armata dell'Arno, mentre nel 1928 la completa erosione della spiaggia di Marina di Pisa promuove la costruzione di una difesa aderente e continua. Tra gli anni '60 e '70, a sud dell'Arno vengono costruite a più riprese dieci scogliere sub-parallele alla costa, poste alla distanza di 80-100 m dalla riva, interrotte da varchi di circa 20 m in corrispondenza dei quali sono state costruite barriere sommerse. Contemporaneamente a nord dell'Arno in località «il Gombo», vengono costruite difese parallele alla costa. Da segnalare che dal 1965 al 1976 nell'armatura destra della foce dell'Arno era attiva un'apertura. Dal 1975 al 2001 vengono posizionate nel tratto meridionale dell'abitato di Marina di Pisa, per circa 1,3 km verso sud, altre 17 barriere parallele ed oblique alla costa. Nel 2001 il sistema di difese costiere viene spostato ulteriormente verso sud con la costruzione di una barriera soffolta parallela alla costa delimitata lateralmente da due pennelli. Tra il 2002 e il 2003 vengono costruiti dieci pennelli nel tratto che si sviluppa tra la destra idrografica della Foce dell'Arno e il Gombo.

## MATERIALI E METODI

Sono state analizzate 340 immagini aeree relative alla costa pisana (Tab. 1a). Per estendere l'ampiezza temporale dell'indagine, sono state utilizzate anche le Sezioni della Carta Tecnica Regionale (CTR, 1:10.000)

del 1997 e due carte storiche dell'Istituto Geografico Militare del 1878 e del 1928 (1:25.000) (Tab. 1b). I punti sulle immagini da georeferire sono stati associati a punti corrispondenti sui file numerici delle Sezioni CTR. Per ogni immagine sono stati individuati un numero di punti di controllo mediamente compreso fra 12 e 20 uniformemente distribuiti. Le immagini georeferenziate sono state usate per costruire fotomosaici estesi a tutto il litorale per ogni anno di ripresa aerea. Su ogni fotomosaico è stata tracciata la corrispondente linea di riva utilizzando gli strumenti di vettorializzazione in ambiente GIS.

Analogamente a quanto già riportato in altri studi (Cipriani *et al.*, 2001), le forti variazioni subite dalla gran parte delle spiagge rendono accettabile l'errore derivante dalla variazione della posizione della linea di riva in funzione delle momentanee condizioni meteorologiche, nonché dalla soggettività dell'operatore.

Tab. 1 - Immagini aeree (a) e cartografia (b) utilizzate, suddivise per ente di appartenenza ed anno di ripresa aerea e rilevamento.

a		
Anno	Ente di appartenenza	Pellicola
1938	I.G.M.	b/n
1944	R.A.F.	b/n
1954	I.G.M.	b/n
1965	I.G.M.	b/n
1975	Regione Toscana	b/n
1982	Regione Toscana	colore
1982	I.G.M.	b/n
1984	Regione Toscana	b/n
1986	I.G.M.	b/n
1987	Regione Toscana	b/n
1990	I.G.M.	infrarosso
1991	Regione Toscana	b/n
1994	Regione Toscana	b/n
1995	Regione Toscana	b/n
1996	I.G.M.	b/n
1997	dx	
2000	Regione Toscana	b/n
2002	Regione Toscana	b/n
2003	Ortofoto	b/n
2004	Provincia di Pisa	colore
b		
Anno	Ente di appartenenza	Scala
1878	I.G.M.	1:25.000
1928	I.G.M.	1:25.000
1997	Regione Toscana	1:10.000

Sulla base dell'esistenza o meno di difese litoranee e della presenza di foci fluviali il litorale è stato suddiviso in 5 tratti (A, B, C, D, E) (Fig. 1), all'interno dei quali è stata analizzata la variazione della linea di riva.

Gli spostamenti di ciascuna linea di riva sono stati calcolati rispetto ad un valore zero di riferimento corrispondente all'anno più vecchio di ripresa aerea disponibile, coincidente con il 1938 per i tratti A, B, C, D e con il 1944 per il tratto E.

Le aree dei poligoni delimitati delle due linee di riva tracciate su due riprese aeree consecutive sono state calcolate per valutare le superfici di spiaggia persa/guadagnata per ogni singolo tratto. Per poter confrontare i dati, i valori di area calcolati sono stati pesati secondo la lunghezza dei singoli tratti.

#### EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA E VARIAZIONE AREALI DI SPIAGGIA

Le variazioni areali di spiaggia per riprese aeree consecutive sono riportate nella Tabella 2 e nelle Figure 2 e 3, pesate secondo la lunghezza del tratto corrispondente. Il tratto A mostra dal 1938 al 1975 un progressivo avanzamento della linea di riva con un costante aumento dell'area di spiaggia, che nel 1975 raggiunge quasi  $300 \times 10^3 \text{ m}^2$  in più rispetto al 1938. Tale aumento è particolarmente evidente negli anni che vanno dal 1938 al 1944 quando si ha un incremento di  $150 \times 10^3 \text{ m}^2$ . A partire dal 1975 si registra un'inversione di questa tendenza che si protrae fino al 1990, quando viene quasi dimezzata la superficie che era stata guadagnata precedentemente. Dal 1990 al 1996 si osserva un nuovo aumento (circa  $70 \times 10^3 \text{ m}^2$ ) che permette di raggiungere un'estensione di  $220 \times 10^3 \text{ m}^2$  maggiore rispetto al 1938. Un inizio di tendenza all'erosione si osserva invece a partire dal 1996.

Nel tratto B dal 1938 al 1944 risultano persi circa  $100 \times 10^3 \text{ m}^2$  di spiaggia. Questa tendenza si mantiene inalterata, seppure con alcune flessioni, fino al 1975, quando la superficie di spiaggia persa risulta circa  $180 \times 10^3 \text{ m}^2$ . Dal 1975 al 1982 si registra un leggero aumento di area di spiaggia, che riprende anche dal 1990 al 1996 con un aumento di circa  $20 \times 10^3 \text{ m}^2$ . Dal 1996 al 2004 si ha un guadagno di altri  $25 \times 10^3 \text{ m}^2$  che permettono di passare da  $-185 \times 10^3 \text{ m}^2$  a circa  $-160 \times 10^3 \text{ m}^2$  rispetto al 1938.

Il tratto C è quello caratterizzato dalla maggiore erosione nel litorale pisano. Gli effetti più marcati di questo fenomeno si registrano dal 1938 al 1965, quando sono persi quasi  $1200 \times 10^3 \text{ m}^2$ . Questo andamento tende a diminuire negli anni successivi, rimanendo però marcato, tanto che dal 1965 al 2004 sono persi altri  $500 \times 10^3 \text{ m}^2$ .

Anche il tratto D registra complessivamente un'intensa erosione. In particolare dal 1938 al 1954, si perdono circa  $350 \times 10^3 \text{ m}^2$ . Dal 1954 al 1965, l'erosione sembra fermarsi, per poi riprendere marcatamente dal 1965 al 1982, periodo nel quale si ha una diminuzione di altri  $200 \times 10^3 \text{ m}^2$ . Tra il 1982 e il 1986 l'area sembra stabile, mentre dal 1986 riprende una nuova forte erosione che si protrae fino al 2004, quando la superficie di area di spiaggia persa rispetto al 1938 è di oltre  $900 \times 10^3 \text{ m}^2$ .

Nel tratto E si osserva un generale aumento dell'area di spiaggia con una tendenza più evidente negli anni che vanno dal 1944 al 1975 in cui si registra un guadagno di circa  $150 \times 10^3 \text{ m}^2$ . Negli anni successivi, la tendenza all'incremento areale rimane inalterata, con piccoli arresti all'avanzamento registrati tra il 1982 e il 1990 e tra il 1996 e il 2003.

La Figura 3 riassume l'andamento globale dei cinque tratti in cui è stato suddiviso il litorale pisano, durante tutto il periodo di osservazione 1938-2004. I tratti posti ai margini settentrionale e meridionale del litorale (A, E) presentano un bilancio areale 1938-2004 complessivamente positivo (rispettivamente  $265691 \times 10^3 \text{ m}^2$  e  $206572 \times 10^3 \text{ m}^2$ ), mentre gli altri tre tratti (B, C, D) evidenziano bilanci areali complessivi negativi per lo stesso intervallo temporale (rispettivamente  $-149344$ ,  $-1703165$ ,  $-921632 \times 10^3 \text{ m}^2$ ).

#### EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA E DIFESE COSTIERE

##### Tratto meridionale

Per il periodo 1938-1975 la forte riduzione di spiaggia ( $180 \times 10^3 \text{ m}^2$ ) osservata nel tratto B può essere correlata al marcato aumento registrato nell'adiacente tratto A ( $300 \times 10^3 \text{ m}^2$ ) (Figg. 2, 3). Nel periodo successivo 1975-1982 questa correlazione non sussiste, essendo il tratto A soggetto a un intenso arretramento e quello B ad un modesto avanzamento. Questo comportamento

Tab. 2 - Variazione areale di spiaggia nei singoli tratti per ogni intervallo temporale considerato. I valori sono pesati secondo la lunghezza dei tratti (A, B, C, D, E) corrispondenti.

	1938-1944	1944-1954	1954-1965	1965-1975	1975-1982	1982-1986	1986-1990	1990-1996	1996-2003	2003-2004	1938-2004
m	m <sup>2</sup> /m										
A (6604)	22,341	13,882	6,330	1,842	-12,856	-4,947	1,742	10,310	-2,376	-2,302	40,232
B (5430)	-18,057	-3,351	-6,978	-4,126	1,317	-2,185	-0,269	4,413	0,896	3,498	-27,503
C (7330)	-50,581	-46,373	-54,441	-13,092	-13,634	-2,302	-8,100	-12,856	-20,893	-1,346	-232,355
D (5400)	-31,707	-33,790	-0,781	-26,279	-13,225	-2,700	-20,110	-15,622	-19,365	-4,261	-170,673
E (1710)		45,181	12,923	30,228	7,840	-1,786	3,185	15,353	-1,570	9,447	

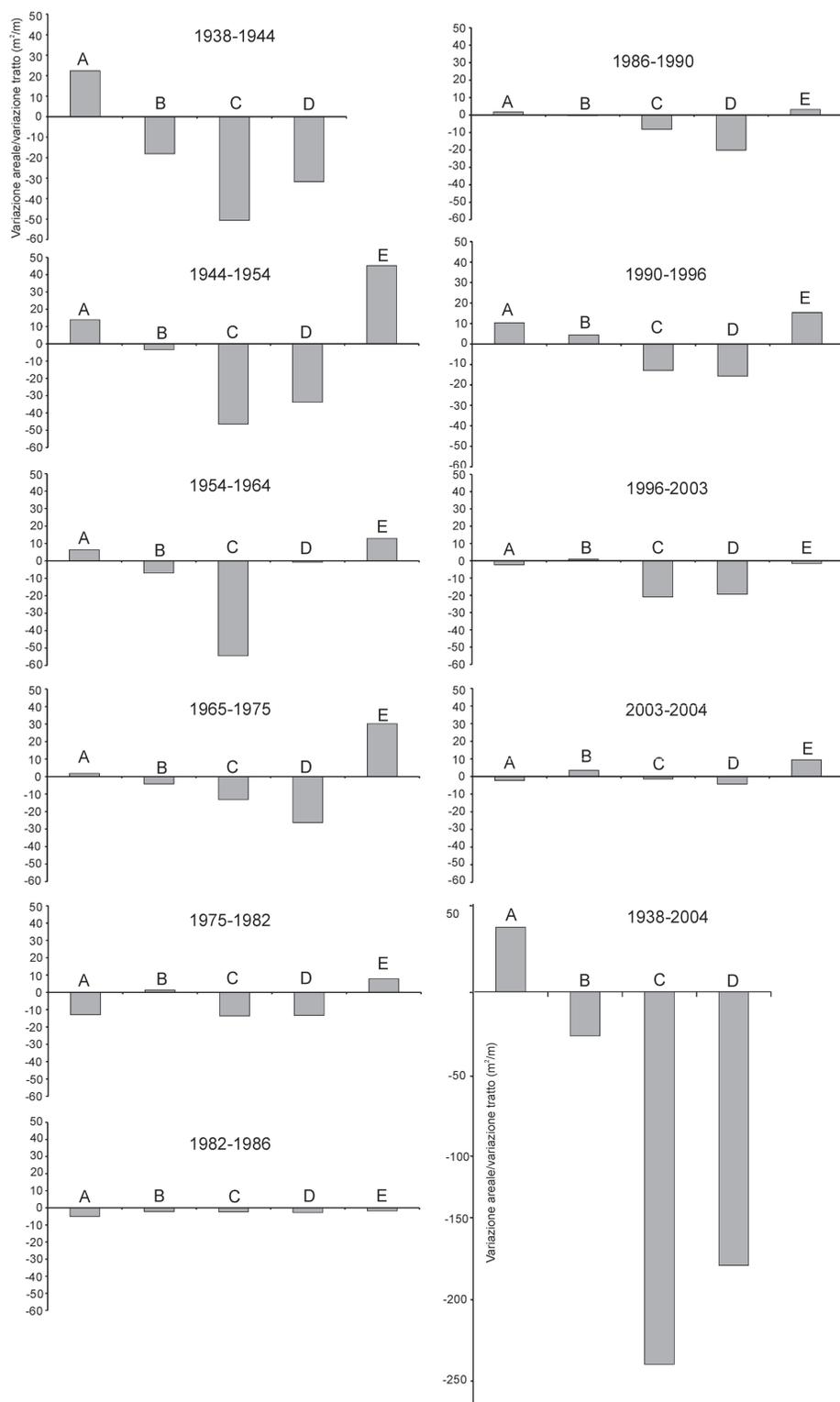


Fig. 2 - Variazione areale di spiaggia dell'intero litorale (tratti A, B, C, D, E) per i singoli intervalli temporali considerati e complessiva su tutto il periodo (tratti A, B, C, D). I valori sono pesati secondo la lunghezza dei tratti (A, B, C, D, E) corrispondenti.

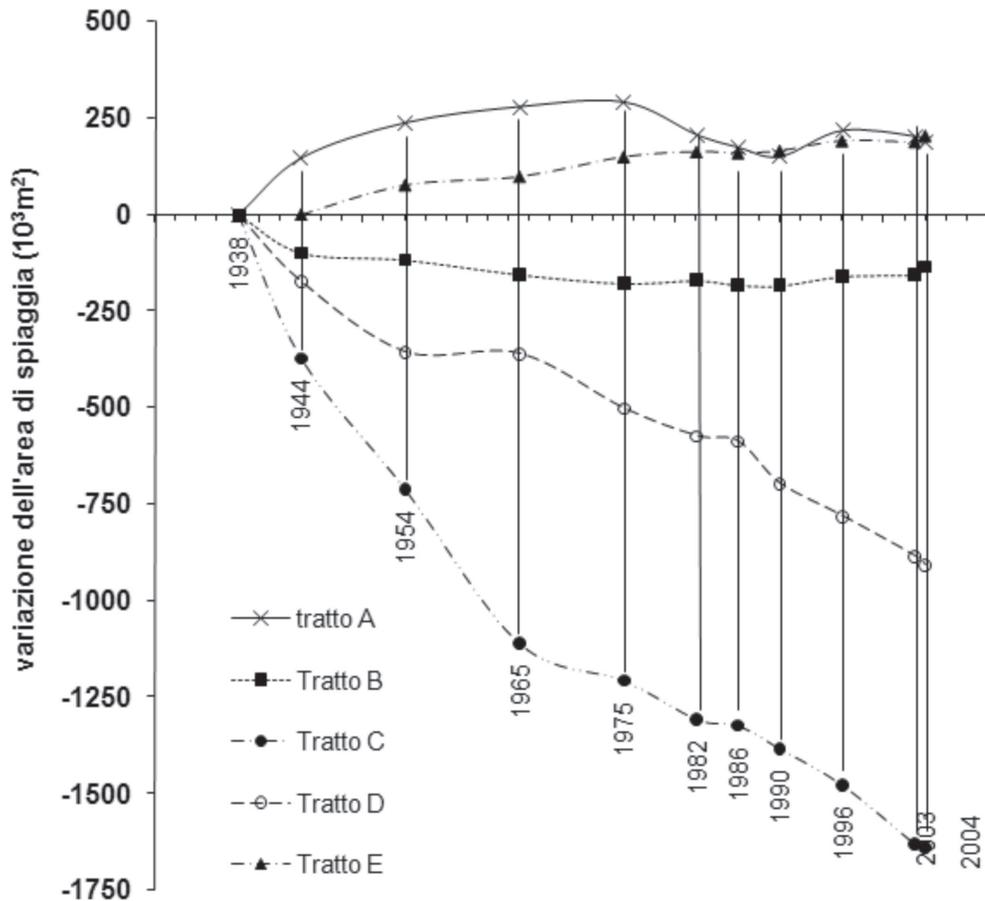


Fig. 3 - Variazione areale di spiaggia dell'intero litorale (tratti A, B, C, D, E) per tutto l'intervallo di tempo considerato (1938-2004).

può essere spiegato considerando la cronologia della costruzione delle difese litoranee (Fig. 4).

Sino al 1975 l'assenza di difese nel tratto a sud dell'abitato di Marina di Pisa permetteva la redistribuzione nel tratto A del materiale eroso nel tratto B. Successivamente a partire dal 1975 la progressiva costruzione di 17 barriere parallele ed oblique alla costa nel tratto sud dell'abitato di Marina di Pisa limita il transito di materiale verso le spiagge di Tirrenia e Calambrone (tratto A) che risultano di fatto in erosione (Fig. 3, 4). Questo andamento si registra anche negli intervalli 1996-2003 e 2003-2004 ed è probabilmente dovuto all'effetto del completamento della barriera soffolta (2001) nella porzione più meridionale del tratto B.

Lo spettro delle linee di riva ottenute mostra, poco a nord dell'abitato di Tirrenia, l'esistenza di una fascia di costa in cui esse tendono ad intersecarsi, suddividendo il litorale in due tronconi con caratteristiche morfologiche

ed evolutive opposte (Fig. 5a, b). A sud di questa fascia, verso Calambrone (tratto A), le linee di riva risultano convesse verso mare e mostrano una complessiva tendenza all'avanzamento, mentre a nord (tratto B) si ha una tendenza opposta, concavità rivolta verso mare e complessiva tendenza alla regressione. In alcuni anni (1938, 1944, 1954, 1975) questa fascia si riduce a un vero e proprio punto (punto neutro) mentre in altri (riprese aeree posteriori al 1975) si estende anche per 500-600 m, con settori in cui le linee di riva coincidono per centinaia di metri. La continua fase di accrescimento areale nel tratto A può essere messa in relazione all'apporto sedimentario da nord generato dall'erosione del tratto B (Marina di Pisa, le spiagge settentrionali di Tirrenia e rispettivi fondali). Non è inoltre da trascurare una potenziale alimentazione dal Canale Scolmatore e/o dalle Secche delle Melorie (Gandolfi & Paganelli, 1975).

Utilizzando esclusivamente le linee di riva dei periodi

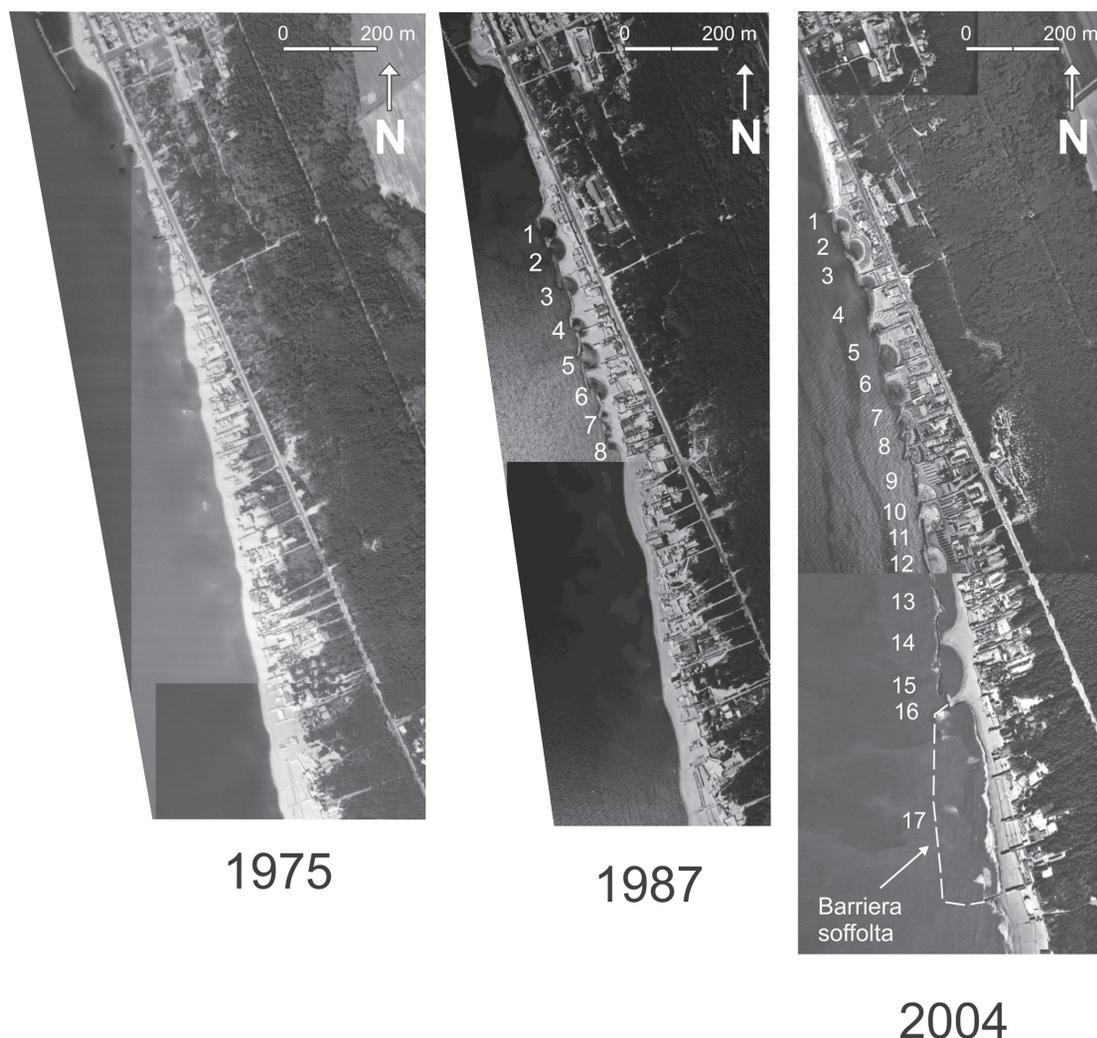


Fig. 4 - Evoluzione delle difese litoranee nel tratto meridionale di Marina di Pisa (tratto B) dal 1975 al 2004.

1938, 1954, 1965, 1975, 1987, 1996 e 2004, al fine di escludere le piccole oscillazioni interannuali, è stata analizzata la variazione della distanza di questa fascia/punto neutro dal Canale Scolmatore (Fig. 6). L'intersezione delle linee di riva del 1938 e 1954 mostra tale punto ubicato a 5750 m dal Canale Scolmatore, nel 1965 si ha un leggero spostamento del punto neutro di circa 350 m verso sud, con una velocità media di 31,5 m/anno. Dal 1965 al 1975 la fascia neutra si sposta verso nord di circa 250 m, con una velocità media di 27 m/anno che si intensifica notevolmente nel periodo 1975-1987 (800 m con una velocità media di 66 m/a). Da segnalare che dal 1975 avviene una migrazione verso sud delle difese costiere con la costruzione della seconda serie di barriere al margine meridionale di Marina di Pisa. Dal 1987 al 1996 si ha un'intensa migrazione della fascia neutra verso sud, che in soli 9 anni si sposta di 2150 m con una velocità media di 238 m/anno. Il periodo 1996-2004 registra un ulteriore

spostamento di 300 m verso sud (con velocità media di 40 m/a) che porta la fascia neutra ad una distanza di circa 4 km dal Canale Scolmatore.

Al margine meridionale del tratto A, gli spostamenti delle linee di riva sono stati correlati con la variazione della geometria a mare del Porto di Livorno. Nel 2000, infatti, è stato ultimato l'ampliamento verso mare della porzione Nord del Porto di Livorno tra la Darsena Toscana ed il Molo Marzocco. Come già ipotizzato da Cappietti *et al.* (2003), la nuova porzione di porto genera notevoli variazioni nell'andamento delle correnti, provocando una marcata erosione nel segmento di costa corrispondente alla porzione meridionale del tratto A. Per studiare nel dettaglio la dinamica di questo settore è stata intensificata la scansione temporale delle osservazioni utilizzando le immagini aeree degli anni 1996, 2000, 2003, 2005. Gli spostamenti e la velocità media lineare di variazione della linea di costa sono stati calcolati lungo due sezioni ortogonali alla linea di



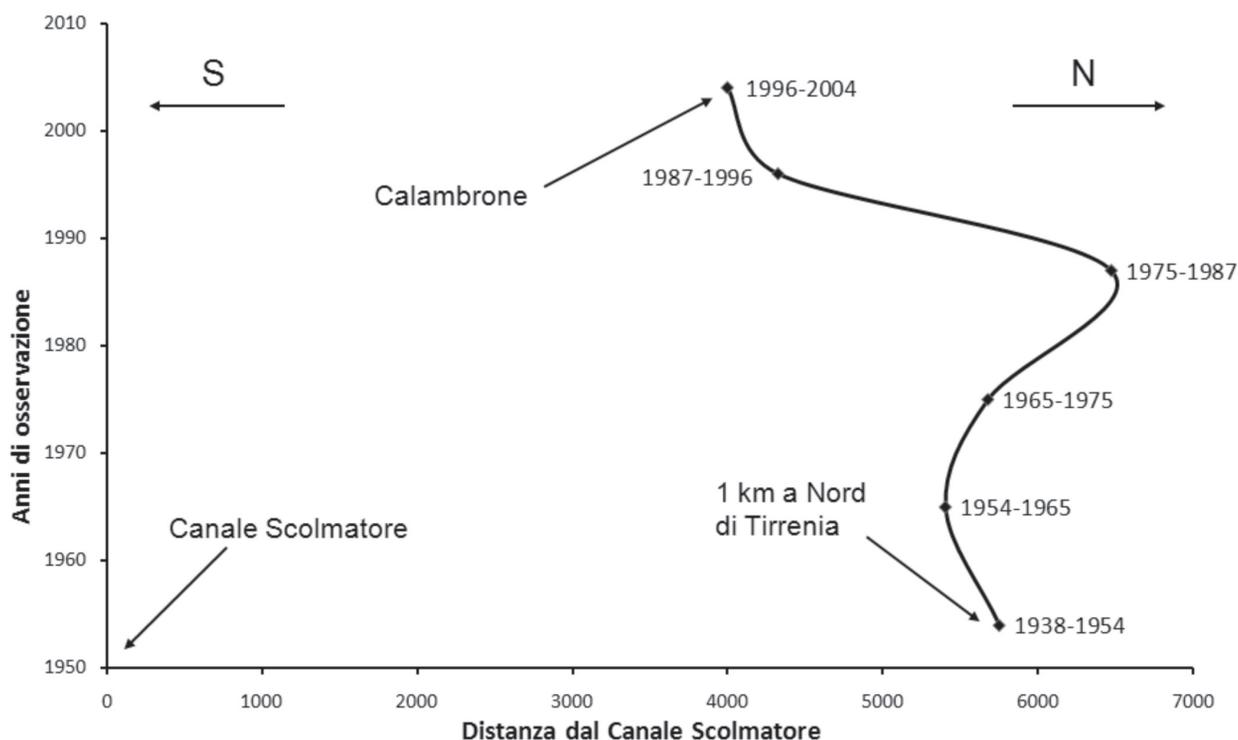


Fig. 6 - Spostamento di posizione del punto/fascia neutro/a rispetto al Canale Scolmatore.

riva (Fig. 7). In particolare i risultati di questa analisi sono riassunti in Figura 7b nella quale si registra un avanzamento della linea di riva nel periodo 1996-2000, concorde con il *trend* evolutivo registrato a partire dal 1938, mentre nel periodo immediatamente successivo all'ampliamento del porto si osserva un arretramento che si protrae fino al 2003 (-18,3 m/a in sezione 1; -10,0 m/a in sezione 2). Successivamente tra il 2003 e il 2005 si registra un'inversione di tendenza con il ristabilirsi delle condizioni di progradazione.

#### Tratto settentrionale

I tratti compresi tra la foce dell'Arno e del Serchio (C e D) hanno subito una continua erosione iniziata alla metà del XIX secolo. Per il periodo 1938-1954 i tratti C e D sono costantemente in erosione. Solo dal 1954 al 1965 all'arretramento della costa nel tratto C corrisponde una relativa stabilità nel tratto D. Il materiale eroso nel tratto meridionale è stato probabilmente accumulato in quello settentrionale, tramite il *drift* prossimale, bilanciando così localmente la generale tendenza all'erosione. Negli anni successivi al 1965 riprende l'erosione in entrambi i tratti, anche se meno marcata rispetto ai periodi precedenti. Secondo alcuni autori (Palla, 1983c), nel tratto D la costruzione (1939) del molo del Fiume Morto Nuovo ha causato l'interruzione del trasporto litoraneo verso nord, con effetti risentiti a partire dal 1966 e massimi raggiunti nel 1977.

L'effetto di questo molo potrebbe essere individuato nella rapida ripresa dell'erosione registrata negli anni 1965-1975 (Fig. 2).

Nel periodo 1965-1975, il tratto C risente dell'apertura alla base della foce armata di destra dell'Arno (1965-76), con la conseguente alimentazione di materiale terrigeno di origine fluviale e della costruzione delle barriere non aderenti del Gombo (1962-1968). Non sono inoltre da escludere i primi effetti della cessazione dei prelievi in alveo (effettiva dal 1969). Il risultato complessivo è quello di un momentaneo rallentamento della tendenza all'arretramento della linea di riva (Fig. 2), che però riprende nel periodo 1975-1982.

In tutto il litorale a nord della foce dell'Arno nel periodo 1982-1986 si osserva un forte rallentamento dell'erosione nei due tratti più meridionali di costa (C, D) e un arresto dell'avanzamento nel tratto più settentrionale (E).

Negli ultimi 18 anni di osservazione (1986-2004) la linea di riva dei tratti C e D ha ripreso ad arretrare marcatamente, causando una riduzione della superficie di spiaggia rispetto al 1938 rispettivamente di circa  $1700 \times 10^3 \text{ m}^2$  e  $900 \times 10^3 \text{ m}^2$ . Nello stesso periodo il tratto E mostra un andamento decisamente contrario a quello dei tratti precedenti. Questa diversità rispetto ai tratti C e D è da mettere in relazione all'ampliamento del molo di Viareggio avvenuta nei primi decenni del 1900 che ha contribuito alla parziale interruzione dell'alimentazione generata dalle correnti litoranee dirette a Nord.

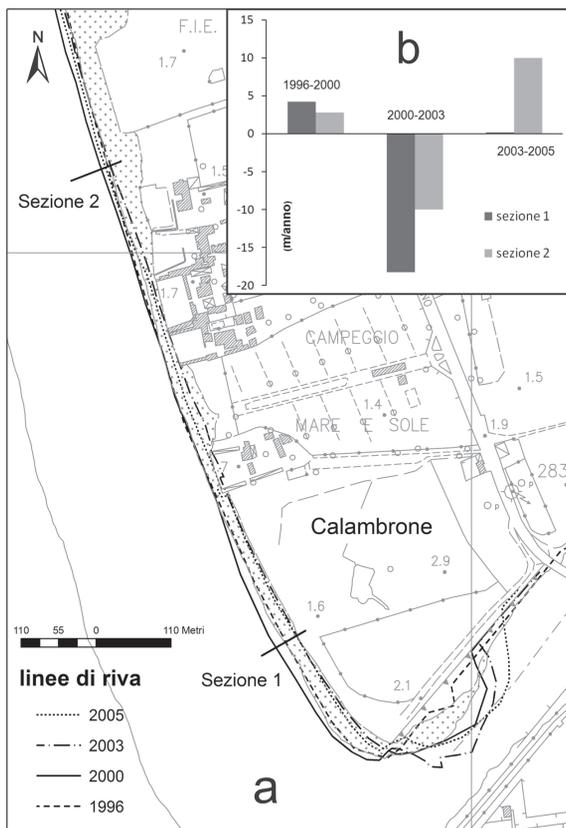


Fig. 7 - Variazione della linea di riva nel periodo 1996-2005 nella porzione più meridionale del tratto A (a). Velocità lineari di spostamento della linea di riva lungo le sezioni 1 e 2 (b).

In questo quadro di generale arretramento della linea di costa, il settore che appare più intensamente soggetto a erosione è quello noto con il nome di «Lame delle Gelosie», immediatamente a nord della foce dell'Arno. Qui, infatti, si osserva dal 1938 al 2004 un arretramento della linea di riva di circa 500 m (Fig. 8a), con velocità media, stimata lungo la linea di apparente massima erosione, pari a 7,6 m/a.

Nella Figura 8b sono riportate le velocità di arretramento della linea di riva alle «Lame delle Gelosie», utilizzando anche i dati estrapolati dalle carte storiche IGM (1878, 1928). La velocità di arretramento che tra 1878 e il 1928 è di 3,6 m/a, subisce una brusca impennata nell'intervallo 1928-1944 (20 m/a), periodo in cui probabilmente si registrano gli effetti negativi legati alla costruzione della foce armata dell'Arno, completata nel 1926. Questa tendenza, nell'immediato dopoguerra, diminuisce notevolmente, per poi riprendere ad aumentare dal 1954. Che la costruzione della foce armata dell'Arno abbia avuto un effetto negativo sull'evoluzione del tratto costiero in esame è confermato dalla evidente diminuzione della velocità di arretramento registrata in concomitanza con il periodo di apertura alla sua base (1965-1976), con il valore minimo di 1,5 m/a raggiunto nel 1975.

## CONCLUSIONI

L'analisi e la georeferenziazione di 340 immagini aeree del litorale pisano ha permesso di assemblare 18 fotomosaici, sui quali è stata ricostruita l'evoluzione della linea di riva per il periodo 1938-2004 e di stimare le corrispondenti perdite e guadagni di area di spiaggia. Lo studio, oltre ad incrementare il dettaglio della ricerca sulle variazioni della linea di riva con un'alta frequenza di riprese aeree, ha permesso di estendere l'indagine sino al 2004 per tutti i tratti analizzati e sino al 2005 per il tratto più meridionale del litorale pisano, consentendo di completare un quadro analitico già parzialmente esistente.

Fra i principali periodi erosivi del litorale pisano, spiccano gli intervalli 1975-1990 per il tratto immediatamente a Nord del Canale Scolmatore, 1938-1954 per il tratto compreso tra le foci dei fiumi Morto Nuovo e Serchio e 1938-1965 per quello a nord della foce dell'Arno. Per questi ultimi due tratti è stata calcolata una superficie di spiaggia persa rispettivamente di circa  $900 \times 10^3 \text{ m}^2$  e  $1700 \times 10^3 \text{ m}^2$ . Per quest'ultimo da segnalare che  $1100 \times 10^3 \text{ m}^2$  sono stati erosi dal 1938 al 1965, con una velocità media di arretramento lineare di circa 11,5 m/a.

I tratti agli estremi opposti della costa pisano risultano prevalentemente in avanzamento per tutto il periodo di osservazione. I motivi di questo comportamento sono comunque diversi: la barriera esercitata dal porto di Viareggio nei confronti dei *drift* litoranei nel tratto più settentrionale, l'apporto sedimentario da spiagge immediatamente a nord per il tratto più meridionale.

Il bilanciamento tra spiagge contigue in erosione o in accrescimento che si verifica nel tratto meridionale della costa trova un suo equilibrio in una fascia/punto neutro ubicato nella zona di Tirrenia. È stata evidenziata una correlazione fra la costruzione di difese costiere e di opere antropiche e successive variazioni nel comportamento della linea di costa. La migrazione verso sud delle difese si accompagna con lo spostamento del punto neutro verso i tratti meridionali del litorale, coinvolgendo nei processi erosivi tratti di costa sempre più prossimi al Canale Scolmatore.

Come l'ampliamento del porto di Livorno (2001) ha causato l'erosione del tratto di costa nei pressi del Canale Scolmatore (fino a 18 m/a di arretramento lineare), la creazione della foce armata dell'Arno (completata nel 1926) ha fortemente incrementato il processo di erosione già attivo nella zona delle «Lame delle Gelosie» (da 3 a 20 m/a di arretramento lineare), diminuito solo nel periodo di creazione di un'apertura nel suo argine destro (1,5 m/a).

Anche se la completa comprensione della dinamica delle spiagge non può prescindere dalla ricostruzione dell'evoluzione dei fondali, dai valori di trasporto solido fluviale e meteomarinari, i dati elaborati in questo lavoro hanno permesso in prima analisi di ricostruire le principali tappe di erosione e accrescimento del litorale pisano, proponendo anche le correlazioni più evidenti con la costruzione delle opere di difesa.

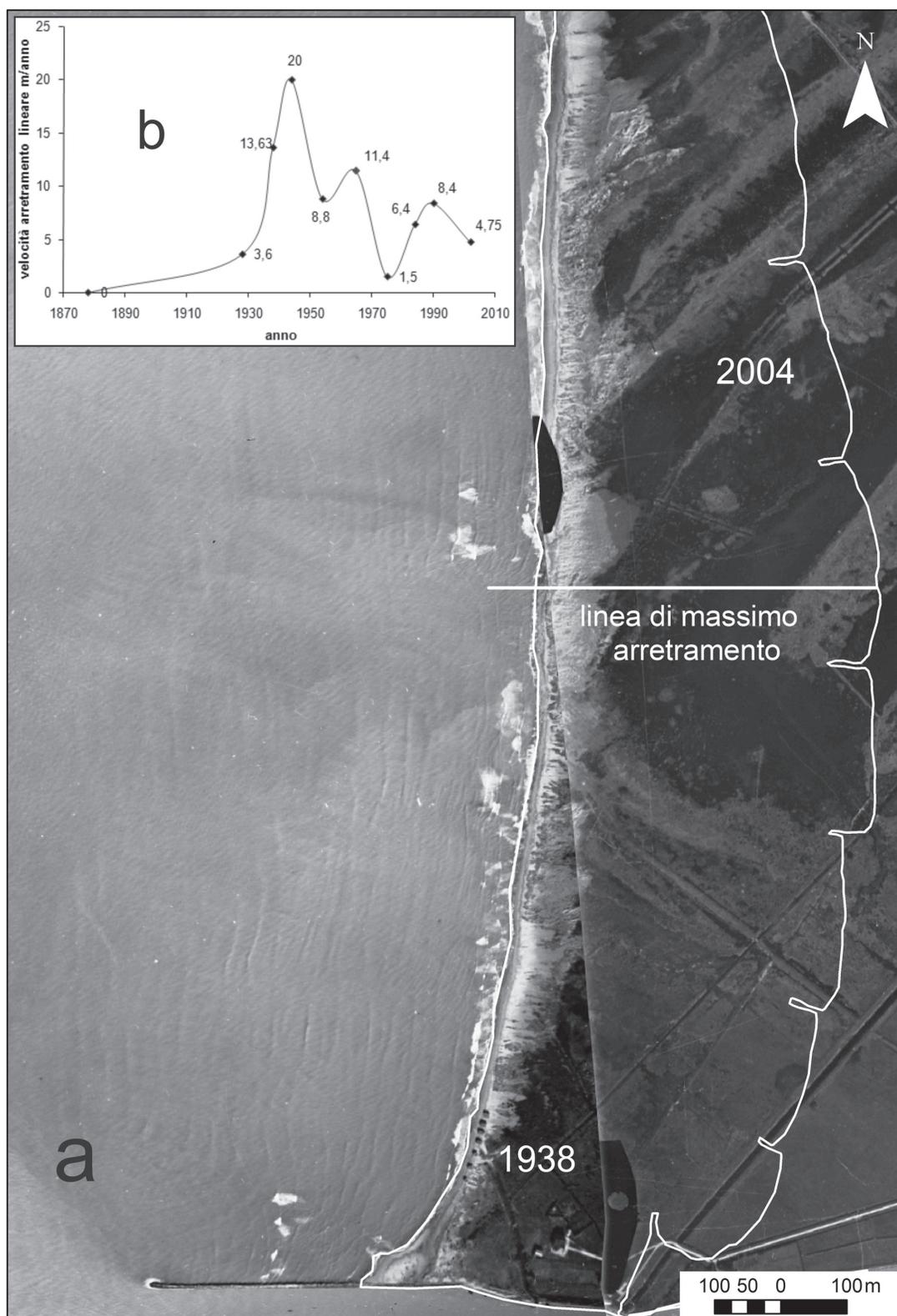


Fig. 8 - Posizione rispetto al 1938 della linea di riva del 2004 nei pressi della località «Lame delle Gelosie» (tratto C) (a). Velocità di arretramento della linea di riva dal 1878 al 2004 lungo la sezione indicata (b). Il dato del 1878 è ricavato dalla carta IGM 1:25.000.

## RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato svolto grazie al contributo e alla collaborazione scientifica con la Provincia di Pisa - Settore Difesa del Suolo (resp. G. Bracci, A. Carli). Si ringraziano P.R. Federici ed E. Pranzini per i suggerimenti e la lettura critica del testo.

## BIBLIOGRAFIA

- Albani D., 1940. Le spiagge della toscana settentrionale dalla foce del fiume Magra ai Monti Livornesi. In: Albani D., Griselli A., Mori A., Ricerche sulle variazioni delle spiagge toscane, 2. CNR Roma: 11-8.
- Aminti P.L., Pranzini E., 2000. Indagine sperimentale per la ristrutturazione delle difese di Marina di Pisa. *Studi Costieri* 3: 57-70.
- Baldini A., Regattieri M., 1983. Correnti prossimali e apporto solido tra la Foce dell'Arno e la Foce del Fiume Morto Nuovo. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, suppl. XC*: 21-34.
- Baldini A., Regattieri M. e Tongiorgi M., 1983. Analisi granulometrica delle sabbie e dinamica del litorale di S. Rossore (Pisa): un anno di osservazioni (aprile 1979 - aprile 1980). *Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, suppl. XC*: 35-79.
- Cappiotti L., Cammelli C., Farrell E., Ferri S., Aminti P.L., Pranzini E., 2003. A case of updrift erosion induced by a harbour breakwater. *Medcoast 2003*, Ravenna:1701-1718.
- Cipriani L.E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F., Pranzini E., 2001. Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale. *Studi Costieri* 4: 119-156.
- Della Rocca B., Mazzanti R., Pranzini E., 1987. Studio Geomorfologico della Pianura di Pisa. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 10: 56-84.
- Federici P.R., 1983. Lineamenti geografici e geomorfologici. In «Dal Calabrone al Burlamacca: Guida alla natura del Parco Migliarino-S. Rossore-Massaciuccoli», Nistri-Lischi Editori, Pisa: 3-17.
- Federici P.R., Mazzanti R., 1993. Note sulle pianure costiere della Toscana. Aspetti fisici e problemi ambientali delle pianure italiane. *Mem. Soc. Geogr. It.* 53: 165-270.
- Gandolfi G., Paganelli L., 1975. Il litorale pisano versiliese (area campione Alto Tirreno) composizione provenienza e dispersione delle sabbie. *Boll. Soc. Geol. It.* 94: 1273-1295.
- Milano V. 1986. Modello dell'evoluzione di un tratto di litorale costruito sulla base di dati storici e sperimentali. *Giornale del Genio Civile* 4-5-6: 87-109.
- Milano V., 1994. L'evoluzione e le caratteristiche meteo-marine del litorale compreso tra i porti di Livorno e Viareggio dal 1864 al 1983. In «L'evoluzione e la dinamica del litorale prospiciente i bacini dell'Arno e del Serchio e i problemi di erosione della costa». *Quaderni dell'Autorità di Bacino dell'Arno e del Serchio* 3: 53-90.
- Noli A., Franco L., 1989. L'evoluzione del litorale pisano: risultati di uno studio con impiego di modelli matematici. Camera di Commercio Industria Artigianato di Pisa, Amministrazione Provinciale di Pisa, Comune di Pisa. Giardini Editore: 1-37.
- Palla B., 1983. La subsidenza nella fascia costiera di S. Rossore (Pisa) nel periodo ottobre 1978 - giugno 1981. Il comportamento dei capisaldi sperimentali. *Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, suppl. XC*: 81-97.
- Palla B., 1983. Tre anni di osservazioni (1978-1981) sulla morfometria della spiaggia campione dalla foce dell'Arno al Gombo (Tenuta di S. Rossore - Pisa). *Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, suppl. XC*: 99-124.
- Palla B., 1983. Variazioni della linea di riva tra i Fiumi Arno e Serchio (Tenuta di S. Rossore - Pisa) dal 1878 al 1981. *Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, suppl. XC*: 125-149.
- Pranzini E., 1983. Studi di geomorfologia costiera: IX - L'erosione del delta dell'Arno. *Quad. Mus. St. Nat. Livorno* 4: 7-18.
- Pranzini E., 2001. Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany (Italy). *Geomorphology* 38: 125-132.
- Pranzini E., 2004. Caratteristiche morfologiche e sedimentologiche di una zona di convergenza del trasporto litoraneo (Versilia, Toscana). *Studi Costieri* 8:135-149.
- Pranzini E., 2008. L'intervento di stabilizzazione del litorale de Le Lame (Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli, Toscana). *Studi Costieri* 14: 29-42.
- Rapetti F., Vittorini S., 1974. Osservazioni sulle variazioni dell'ala destra del delta dell'Arno. *Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A*: 25-88.
- Rapetti F., Vittorini S., 1978. Osservazioni sul clima del litorale pisano. *Riv. Geogr. It.* LXXXV (1): 1-22.
- Rapetti F., Vittorini S., 1983. Brevi considerazioni sull'influenza dei venti riguardo alle fluttuazioni della linea di costa del litorale di S. Rossore (Pisa). *Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, suppl. X*: 13-20.
- Saggini F., 1967. Morfologia costiera e trasporto detritico marino del litorale della Provincia di Livorno. Atti del convegno per la difesa del litorale toscano. Amministrazione provinciale di Pisa: 58-69.
- Toniolo A.R., 1910. Sulle Variazioni di spiaggia a foce d'Arno (Marina di Pisa) dalla fine del secolo XVIII ai nostri giorni: Studio storico fisiografico. Comune di Pisa (a cura di), Tipografia Municipale, Pisa: 1-93.
- Toniolo A.R., 1927. Variazioni storiche del litorale toscano tra l'Arno e la Magra. Atti X Congresso Geografico Italiano, Milano.
- Vittorini S., 1977. Variazioni della linea di costa al Gombo (litorale pisano). *Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A*: 91-103.

(ms. pres. il 24 novembre 2008; ult. bozze il 10 aprile 2009)