



Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale  
Scali Rosciano, 6 - 57123 Livorno, Italia

R.U.P. ing. Enrico Pribaz  
D.E.C. ing. Ilaria Lotti

R.T.P.



30035 Mirano (VE)  
Viale Belvedere, 8/10  
www.fm-ingegneria.com

Tel. +39 041 5785 711  
Fax +39 041 4355 933  
portolivorno@fm-ingegneria.com



P.O. Box 1132  
3800 BC Amersfoort  
The Netherlands  
www.royalhaskoningdhv.com

Tel. +44 (0)207 222 2115  
Fax +44 (0)207 222 2659  
info@rhdhv.com



35027 Noventa Padovana (PD)  
Via Panà 56/a

Tel. +39 049 8945 087  
Fax +39 049 8707 868  
mail@hsmarinesrl.com



31027 Spresiano (TV)  
Via Tiepolo, 8  
www.gtgeo.it

Tel. +39 0422 8870 31  
Fax +39 0422 8895 89  
info@gtgeo.it

PROGETTO

**PROGETTAZIONE PRELIMINARE E DEFINITIVA DELLE  
OPERE MARITTIME DI DIFESA E DEI DRAGAGGI PREVISTI  
NELLA NUOVA PRIMA FASE DI ATTUAZIONE DELLA  
PIATTAFORMA EUROPA, COMPRESO LO STUDIO DI  
IMPATTO AMBIENTALE E LA VALUTAZIONE DI INCIDENZA  
AMBIENTALE**

EMISSIONE

**PROGETTO PRELIMINARE**

TITOLO

**D - IDRAULICA MARITTIMA**  
Studio morfologico di base

REV.	DATA	FILE	OGGETTO	DIS.	APPR.
1					
2					
3					
4					
5					

ELABORATO N.

**D002**

DATA: 08/11/2019	SCALA: -	FILE: 1233_PP-D-002_0.doc	J.N. 1233/'19
PROGETTO N. Sguotti	DISEGNO P. Innangi	VERIFICA M. Tondello	APPROVAZIONE T. Tassi

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

## Indice generale

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO DELL'AREA DI INTERESSE</b>	<b>5</b>
2.1	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA DI INTERESSE	5
2.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	7
2.3	CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE DELL'AREA DI INTERESSE	7
2.4	DESCRIZIONE DELLO STATO DEI LUOGHI	11
2.4.1	LITORALE DI CALAMBRONE	11
2.5	LITORALE DI TIRRENIA	15
2.6	LITORALE DI MARINA DI PISA	19
<b>3</b>	<b>EVOLUZIONE STORICA DEL LITORALE TRA FOCE ARNO E IL PORTO DI LIVORNO</b>	<b>25</b>
3.1	SINTESI DEGLI STUDI PREGRESSI	25
3.1.1	EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA	26
3.1.2	EVOLUZIONE DELLA FOCE DELL'ARNO E DEI FONDALI ANTISTANTI	39
3.1.3	EVOLUZIONE DELLA FOCE DELLO SCOLMATORE E DEI FONDALI ANTISTANTI	45
3.1.4	INTERPRETAZIONE DELLA DINAMICA LITORANEA	48
3.1.5	SITUAZIONI DI CRISI ED INTERVENTI DI PROTEZIONE	49
3.2	STRATEGIA DI DIFESA ATTUALE	50
3.3	EVOLUZIONE RECENTE DEL LITORALE	52
<b>4</b>	<b>ANALISI DEL TRASPORTO POTENZIALE</b>	<b>54</b>

## Indice delle figure

Figura 2.1–Inquadramento geografico del tratto di interesse.....	6
Figura 2.2 – Inquadramento geografico del tratto di interesse (particolare della zona del Calambrone) 6	
Figura 2.3 – Inquadramento geografico del tratto di interesse (particolare di foce Arno).....	6
Figura 2.4 - Stralcio della carta nautica nel tratto di interesse .....	8
Figura 2.5 - Stralcio della carta geomorfologica della Toscana.....	9
Figura 2.6-Punti di scatto eseguiti nel tratto di litorale di fronte a Calambrone .....	11
Figura 2.7 - Foto 1: Spiaggia di fronte a Camping Mare e Sole – vista verso Sud .....	12
Figura 2.8 - Foto 2: Spiaggia di fronte a Camping Mare e Sole – vista verso Nord.....	12
Figura 2.9 - Foto 3: Spiaggia di fronte a Oasi del Mare – vista verso Nord .....	13
Figura 2.10 - Foto 4: Spiaggia di fronte a Regina del Mare – vista verso Nord.....	13
Figura 2.11 - Foto 5: Spiaggia di fronte a Bagno La Siesta – vista verso Nord .....	14
Figura 2.12 - Foto 6: Spiaggia di fronte a Toscana Charme Resort – vista verso Nord.....	14
Figura 2.13 - Punti di scatto eseguiti nel tratto di litorale di fronte a Tirrenia.....	15
Figura 2.14 - Foto 7: Spiaggia di fronte a Lido del Finanziere – vista verso Nord .....	16
Figura 2.15 - Foto 8: Spiaggia di fronte a Bagni Delfino – vista verso Nord .....	16
Figura 2.16 - Foto 9: Spiaggia di fronte a Oasi del Mare – vista verso Nord .....	17
Figura 2.17 - Foto 10: Spiaggia di fronte a Regina del Mare – vista verso Nord.....	17
Figura 2.18 - Foto 11: Spiaggia di fronte a Bagno La Siesta – vista verso Nord .....	18
Figura 2.19 - Foto 12: Spiaggia di fronte a Toscana Charme Resort – vista verso Nord.....	18
Figura 2.20 - Punti di scatto eseguiti nel tratto di litorale di fronte a Marina di Pisa .....	19
Figura 2.21 - Foto 13: Spiaggia di fronte a Bagno Lido – vista verso Sud .....	20
Figura 2.22 - Foto 14: Spiaggia di fronte a Bagno Lido – vista verso Sud .....	20
Figura 2.23 - Foto 15: Spiaggia di fronte a Bagno Lido – vista verso Nord.....	21
Figura 2.24 - Foto 16: Spiaggia di fronte a Camping Internazionale – vista verso Nord .....	21
Figura 2.25 - Foto 17: Spiaggia di fronte a Pia Para Ti – vista verso Nord.....	22
Figura 2.26 - Foto 18: Spiaggia di fronte a via E.Masca – vista verso Sud.....	22
Figura 2.27 - Foto 19: Spiaggia tra il primo e il secondo pennello (partendo da Sud) – vista verso Sud. 23	
Figura 2.28 - Foto 20: Terrazza Pontecorvo – vista verso Nord.....	23
Figura 2.29 - Foto 21: Terrazza Pontecorvo – vista verso Sud .....	24
Figura 2.30 - Foto 22: Foto da imboccatura Porto di Livorno – vista verso Sud .....	24
Figura 3.1- Caratteristiche morfologiche dell'unità fisiografica e direzioni del trasporto longitudinale. 25	
Figura 3.2 - Antiche linee di riva tra Livorno e Bocca di Magra in relazione ai siti archeologici più significativi .....	26
Figura 3.3 - Variazioni della linea di riva rispetto a quella del 1846 (quaderno n 3 – Adb Arno 1994) ...	27
Figura 3.4 - Evoluzione storica della linea di battigia tra il porto di Livorno e la destra idraulica dell'Arno (quaderno n 3 – Adb Arno 1994).....	27
Figura 3.5 - Variazione totale dell'area di spiaggia dal 1938 al 2004 nei singoli tratti di costa.....	28
Figura 3.6 - Variazione areale di spiaggia dal 1938 al 1944 .....	29
Figura 3.7 - Variazione areale di spiaggia dal 1944 al 1954 .....	29
Figura 3.8 - Variazione areale di spiaggia dal 1954 al 1965 .....	30
Figura 3.9 - Variazione areale di spiaggia dal 1965 al 1975 .....	30
Figura 3.10 - Variazione areale di spiaggia dal 1975 al 1982 .....	31
Figura 3.11 - Variazione areale di spiaggia dal 1982 al 1986 .....	31
Figura 3.12 - Variazione areale di spiaggia dal 1986 al 1990 .....	32

Progetto: Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Livello progettazione: Progetto di fattibilità tecnico economica	Elaborato: IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-002_0.docx
--	---	---

Figura 3.13 - Variazione areale di spiaggia dal 1990 al 1996 .....	32
Figura 3.14 - Variazione areale di spiaggia dal 1996 al 2003 .....	33
Figura 3.15 - Tasso medio di spostamento della linea di riva fra il 1938 e il 1997 nei 14 settori in cui è stato diviso il litorale .....	34
Figura 3.16 - Tasso medio di spostamento della linea di riva fra il 1997 e il 2002 nei 14 settori in cui è stato suddiviso il litorale .....	34
Figura 3.17 - Tassi di variazione annuale della linea di riva nel periodo 2005-2018 (Rapporto LaMMA)	35
Figura 3.18 - Linee di riva per il litorale di Marina di Pisa - anno 2018, 2004, 1996, 1982,1965,1938 ...	36
Figura 3.19 - Linee di riva per il litorale di Tirrenia - anno 2018, 2004, 1996, 1982,1965,1938 .....	37
Figura 3.20 - linee di riva per il litorale di Calambrone - anno 2018, 2004, 1996, 1982,1965,1938 .....	38
Figura 3.21 - Andamento del trasporto solido longitudinale nel tratto di litorale compreso tra i porti di Livorno e Viareggio dal 1846 al 1983 dalla profondità di chiusura alla battigia .....	40
Figura 3.22 - Tratto a Nord della foce dell'Arno. Linee di riva 1976 (CTR), 1983 (Idrocart, Genova), 1993 (Università di Firenze) .....	41
Figura 3.23 - Tratto a Sud della foce dell'Arno.Linee riva 1976 (CTR), 1983 (Idrocart, Genova), 1993 (Università di Firenze) .....	42
Figura 3.24 - Profili barimetrici del 1983 (Idrocart, Genova) e del 1993 (Università di Firenze) per il tratto di litorale tra Tirrenia e la foce del Fiume Morto Nuovo .....	43
Figura 3.25 - Profili batimetrici del 1983 (Idrocart, Genova) e del 1993 (Università di Firenze) per il tratto di litorale tra Tirrenia e la foce del Fiume Morto Nuovo .....	44
Figura 3.26 - Variazione batimetrica avvenuta fra il 1997 e il 2002 nei fondali antistanti il Calambrone .....	46
Figura 3.27 - Confronto tra curve isobatimetriche - rilievo novembre 2012 e ottobre 2013 .....	47
Figura 3.28 - Evoluzione fondale al termine della mareggiata SO e Hmax 4.9 in seguito alla costruzione della foce armata.....	48
Figura 3.29 - Tratto meridionale del litorale, interessato dall'ipotesi di prolungamento delle diga soffolta .....	51
Figura 3.30 - Limite superiore della fascia di battigia rilevato nel tratto di litorale di Calambrone .....	52
Figura 3.31 - Limite superiore della fascia di battigia rilevato nel tratto di litorale di Tirrenia .....	52
Figura 3.32 - Limite superiore della fascia di battigia rilevato nella zona più critica del litorale di Calambrone .....	53
Figura 3.33 - Limite superiore della fascia di battigia rilevato nella zona più critica del litorale di Tirrenia .....	53
Figura 4.1 - Batimetria di dettaglio con ubicazione dei punti di output del clima locale .....	54
Figura 4.2 – Rose delle energie per i 6 punti sottocosta con riferimento a: configurazione attuale del porto (a sinistra in verde) e di progetto (a destra in rosso) .....	55
Figura 4.3 –Direzione del trasporto potenziale per il primo tratto a Nord dello Scolmatore (litorale del Calambrone)Confronto flussi in configurazione attuale del porto (verde) e di progetto (rosso) .....	57
Figura 4.4 - Direzione del trasporto potenziale per il secondo tratto a Nord dello Scolmatore (litorale di Tirrenia) Confronto flussi in configurazione attuale del porto (verde) e di progetto (rosso) .....	57
Figura 4.5- Direzione del trasporto potenziale per il terzo tratto a Nord dello Scolmatore (litorale di Marina Di Pisa) Confronto flussi in configurazione attuale del porto (verde) e di progetto (rosso) .....	58



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

## 1 PREMESSA

Il presente studio è stato sviluppato a supporto della progettazione delle opere previste dalla prima fase di attuazione della Piattaforma Europa.

Lo studio morfologico di base riveste una particolare importanza per il progetto della nuova Piattaforma Europa e, in generale, per tutte le nuove infrastrutture portuali che sono previste dal Piano Regolatore Portuale. Tale importanza è legata non solo alla gestione dei potenziali impatti negativi, ma anche e soprattutto alle possibili sinergie che potrebbero derivare dalla gestione dei sedimenti per il ripristino del bilancio sedimentario di aree in forte e irreversibile erosione.

La realizzazione della Piattaforma Europa e degli interventi di dragaggio connessi comporta un esubero di circa 6÷7 milioni di metri cubi di sedimenti sui circa 13 totali che verranno dragati. La natura dei sedimenti interessati dal dragaggio è varia (limo, sabbia, ghiaia fine) e i sedimenti stessi dovranno essere caratterizzati ai sensi della normativa vigente per poter individuare la destinazione finale; tuttavia è più che lecito presumere che una buona parte di essi possa risultare idonea per il ripascimento della spiaggia emersa e sommersa. In realtà, proprio quest'ultima opzione potrebbe risultare di maggiore interesse, con lo scopo di ricostruire il lobo Sud della cuspide deltizia sommersa del fiume Arno; tale elemento morfologico risulta infatti in fortissima erosione negli ultimi decenni e, come conseguenza, si sono verificati i fenomeni erosivi di Marina di Pisa e delle spiagge a Sud, verso Tirrenia. Il fenomeno è progressivamente meno marcato verso Sud, ma comunque in evoluzione.

Le considerazioni di cui sopra vanno contestualizzate nel regime della dinamica litoranea locale, ampiamente documentata da numerosi studi (vedi bibliografia) e indagata in dettaglio anche nell'ambito del presente progetto ("Studio della dinamica litoranea", Elaborato. 1233\_PP-D-004\_0).

La dinamica del trasporto solido locale, alimentata in passato dall'apporto solido fluviale proveniente da Nord, è oggi legata sostanzialmente all'apporto solido dei litorali sopraflutto. Il trasporto solido in prossimità di foce Arno è diretto da Nord verso Sud e tende a diminuire verso Sud; le spiagge a Nord sono infatti in erosione, mentre quelle più a Sud sono progressivamente più stabili.

Alcune pubblicazioni (Pranzini, 2003) individuano nella realizzazione delle colmate un elemento di perturbazione, che ha prodotto uno squilibrio del regime locale del trasporto solido; tale tesi è senza dubbio condivisibile, in quanto la colmata protegge il litorale adiacente dalle mareggiate di Libeccio e Mezzogiorno, ed inibisce localmente la formazione delle corrente litoranea diretta verso Nord. Va tuttavia osservato che l'effetto locale delle colmate, e in futuro potenzialmente quello della Piattaforma Europa, si inserisce in una dinamica che risente in misura sostanziale della presenza delle Secche della Meloria, che con la loro erosione contribuiscono probabilmente, seppur limitatamente, anche all'alimentazione della spiaggia nella zona del Calambrone (Gandolfi e Paganelli, 1976).

Il presente elaborato ha lo scopo di fornire una descrizione complessiva del quadro conoscitivo del sito, ampiamente indagato nel recente passato.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

## 2 INQUADRAMENTO DELL'AREA DI INTERESSE

### 2.1 Inquadramento geografico dell'area di interesse

L'area di interesse è il litorale posto a Nord del Porto di Livorno, che si sviluppa tra le località Calambrone, Tirrenia e Marina di Pisa (cfr. Figura 2.1). Il litorale è caratterizzato da una orientazione prevalentemente Nord-Sud e da una lunghezza pari a circa 10 km.

Il paraggio risulta delimitato dai due elementi idrografici principali dell'area: il Fiume Arno (a Nord) e il canale artificiale Scolmatore (a Sud), entrambi caratterizzati da un apparato focivo antropizzato.

Tutto il litorale risulta urbanizzato, anche se permangono ampi tratti dunali caratterizzati dalla presenza di vegetazione arbustiva ed erbacea, in particolare a Nord di Tirrenia dove si trova l'Oasi WWF "*Dune di Tirrenia*". Tutto il litorale viene ampiamente utilizzato a fini turistico-balneari ed è caratterizzato dalla presenza di numerose strutture (turistico recettive e stabilimenti balneari).

Il canale artificiale Scolmatore è caratterizzato da un'armatura di foce rigida e aggettante per una lunghezza di circa 500 m, realizzata con scogliera in massi. A ridosso dell'armatura di foce, in destra idrografica, è presente un'ampia falcata litoranea (Figura 2.2); la spiaggia a ridosso della foce è stata recentemente ampliata mediante ripascimento con i materiali provenienti dai lavori di dragaggio della foce.

Il tratto meridionale del litorale (circa 3.5 km), in località Calambrone, è caratterizzato dalla presenza di numerose strutture balneari che si protendono in alcuni punti fino alla linea di riva; la spiaggia, sabbiosa, in questo tratto, ha un'ampiezza media di circa 50 m e si sviluppa di fronte ad un apparato dunale con presenza di vegetazione di pregio.

Il tratto centrale del litorale (circa 3.5 km), in località Tirrenia, presenta un più ampio apparato dunale, che raggiunge la massima larghezza nella zona centrale dell'area, dove la profondità della spiaggia raggiunge anche i 100 m.

Il tratto settentrionale del litorale, in località Marina di Pisa, presenta una netta variazione della morfologia della costa, con presenza di numerose opere di difesa in massi, realizzate in diverse epoche, a protezione della costa dall'erosione e dall'ingressione marina. Nella parte più a Sud la realizzazione delle barriere ha portato alla formazione di numerosi tomboli, che permettono l'esistenza di una fascia di spiaggia emersa, di fatto sospesa rispetto alla spiaggia sommersa all'esterno delle barriere, dove le profondità subiscono un repentino incremento. Nella parte più a Nord la spiaggia, ricostruita con materiale ghiaioso, è protetta da un sistema a celle formato da pennelli, barriere emerse e sommerse; anche in questo caso si tratta di una spiaggia sospesa per la presenza di profondità molto elevate all'esterno delle celle.

Il Fiume Arno nel suo tratto terminale, in particolare in sinistra idrografica, risulta fortemente urbanizzato. L'armatura di foce, in sinistra idrografica, è costituita dal molo foraneo del Porto di Pisa, mentre in destra è formata da una scogliera in massi naturali; la linea di riva in destra, in assenza delle pesanti opere di difesa presenti in sinistra, è più arretrata di circa un chilometro, come risultato dell'erosione dell'ultimo secolo (Figura 2.3).

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

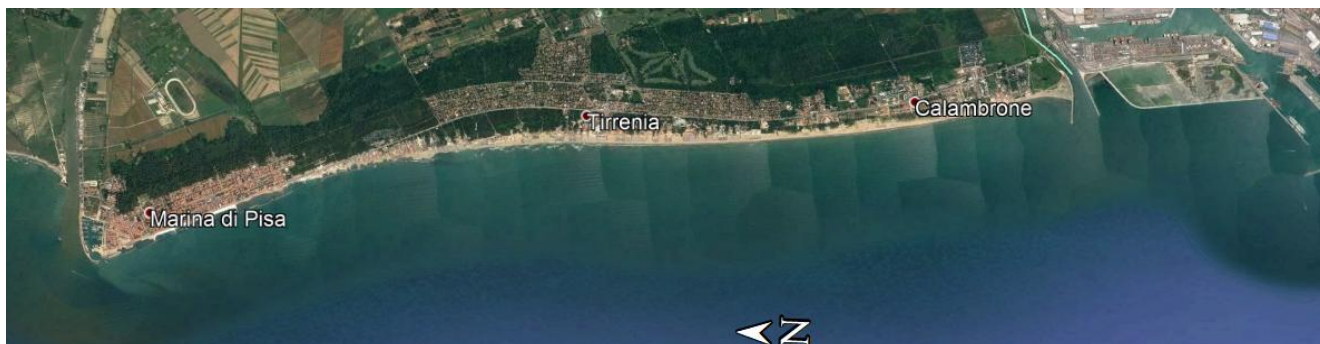


Figura 2.1–Inquadramento geografico del tratto di interesse



Figura 2.2 – Inquadramento geografico del tratto di interesse (particolare della zona del Calambrone)



Figura 2.3 – Inquadramento geografico del tratto di interesse (particolare di foce Arno)

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-002_0.docx

## 2.2 Inquadramento geologico

Il tratto di costa prospiciente il bacino dell'Arno fa parte di una zona subsidente, limitata da sistemi di fratture tettoniche (faglie), il cui sprofondamento ha individuato un'area che a più riprese è stata sommersa dal mare.

La tettonica ha avuto un grande ruolo nella formazione del bacino fino al Pleistocene inferiore (circa 1 milione di anni fa); a partire dal Pleistocene superiore (125'000 anni fa) e fino all'Olocene (circa 10'000 anni fa), nella costruzione del litorale, appare più evidente l'effetto delle oscillazioni climatiche con le conseguenti variazioni del mare.

Nel periodo più recente (ultimi 6'000 anni) si sono attenuate le oscillazioni climatiche e il paesaggio appare più fortemente determinato dall'impatto dell'uomo; in particolare, si osserva negli ultimi 3'000 anni un avanzamento della linea di riva, dovuto soprattutto dall'incremento del materiale trasportato dai fiumi, causato principalmente dall'attività antropica (allevamento, agricoltura, insediamenti rurali), che ha favorito l'erosione del suolo.

Anche lo spostamento artificiale dell'Arno con il "taglio ferdinando", iniziato nel 1606, ha contribuito localmente all'avanzamento del litorale a causa del maggior trasporto solido e al diverso orientamento della foce che ha favorito il deflusso delle piene.

Alla metà del secolo scorso sono cominciati i primi fenomeni di erosione, tutt'ora in corso, con lo smantellamento del delta fluviale. Infatti, dal 1850 ad oggi, con la diminuzione dell'apporto solido fluviale, la dinamica del trasporto solido lungo il litorale da parte del moto ondoso è avvenuta soprattutto a spese dello smantellamento del delta (emerso e sommerso) dell'Arno.

## 2.3 Caratteristiche geomorfologiche dell'area di interesse

Come anticipato nel paragrafo precedente i lineamenti geomorfologici della piana dell'Arno sono stati essenzialmente modellati da tre fattori diversi:

- un fenomeno *tettonico*, operante su scala temporale geologica, che ha modellato la crosta terrestre su larga scala;
- un fattore *climatico*, operante sulla scala temporale delle decine di migliaia di anni, che ha variato il livello del mare (con oscillazioni riscontrate fino a circa 150 m) e i paesaggi vegetali delle aree emerse, regolandone l'erosione e il conseguente apporto di depositi detritici;
- un fattore *umano*, in rapida progressione, operante su scala temporale a breve termine.

Un ulteriore importante elemento che ha contribuito alla modellazione dell'attuale assetto del tratto di litorale di interesse è la presenza delle Secche della Meloria. Le Secche sono formate da un ampio bassofondo roccioso che si estende per circa 40 chilometri quadrati con alcune parti affioranti (cfr. successiva Figura 2.4). I suoi fondali variano in media dai 3 a 12 metri di profondità e sono costituiti da una alternanza di ampie radure di sabbia, praterie di Posidonia Oceanica e da tipiche formazioni geologiche dette "catini".

La presenza di tali scogliere rappresenta un elemento di interferenza sia con il moto ondoso che con la circolazione idrodinamica. Le secche infatti determinano processi di diffrazione, rifrazione e frangimento dovuto ai bassi fondali, che modificano profondamente la propagazione dell'onda incidente dal largo verso il litorale di interesse e la dinamica litoranea.

I processi di trasformazione dell'onda sulle secche determinano il regime locale delle correnti litoranee, per l'analisi dettagliata delle quali si rimanda all'elaborato relativo allo studio della dinamica



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

litoranea (1233\_PP-D-004\_0). Quest'ultima risulta caratterizzata da un punto di convergenza del trasporto solido nella zona centro-meridionale della spiaggia di Tirrenia; i sedimenti dell'Arno alimentano, o, meglio, alimentavano la spiaggia verso Marina di Pisa e quelli dello Scolmatore alimentano la spiaggia del Calambrone. Si può inoltre ipotizzare che le Secche della Meloria abbiano contribuito, sulla lunga scala temporale, all'alimentazione del litorale, come pure all'accumulo dei sedimenti nella zona di relativa calma di moto ondoso tra le Secche e la costa.

Dal punto di vista geomorfologico, l'elemento caratterizzante il tratto di costa di interesse è rappresentato dall'apparato deltizio dell'Arno, formatosi per progressivo accumulo dei sedimenti trasportati dal fiume al mare. Il delta e la fascia costiera del litorale costituiscono una estesa area di transizione tra l'ambiente marino, dominato dai processi e dalle dinamiche del moto ondoso, e l'ambiente continentale alluvionale caratterizzato da processi completamente diversi.

L'ampiezza media di questa fascia di transizione risulta essere di circa 4 Km e raggiunge la massima estensione in corrispondenza dell'apparato deltizio del Fiume Arno dove si protende verso l'interno fino ad una distanza di 7 km dalla costa.

Nella Figura 2.5 viene riportato uno stralcio della Carta Geomorfologica della Regione Toscana; si può osservare che la fascia litoranea e la parte retrostante sono caratterizzate prevalentemente da forme e depositi di origine eolica (dune) intervallate da depositi di origine palustre e lagunare, sovrapposti ad un deposito di tipo fluviale.

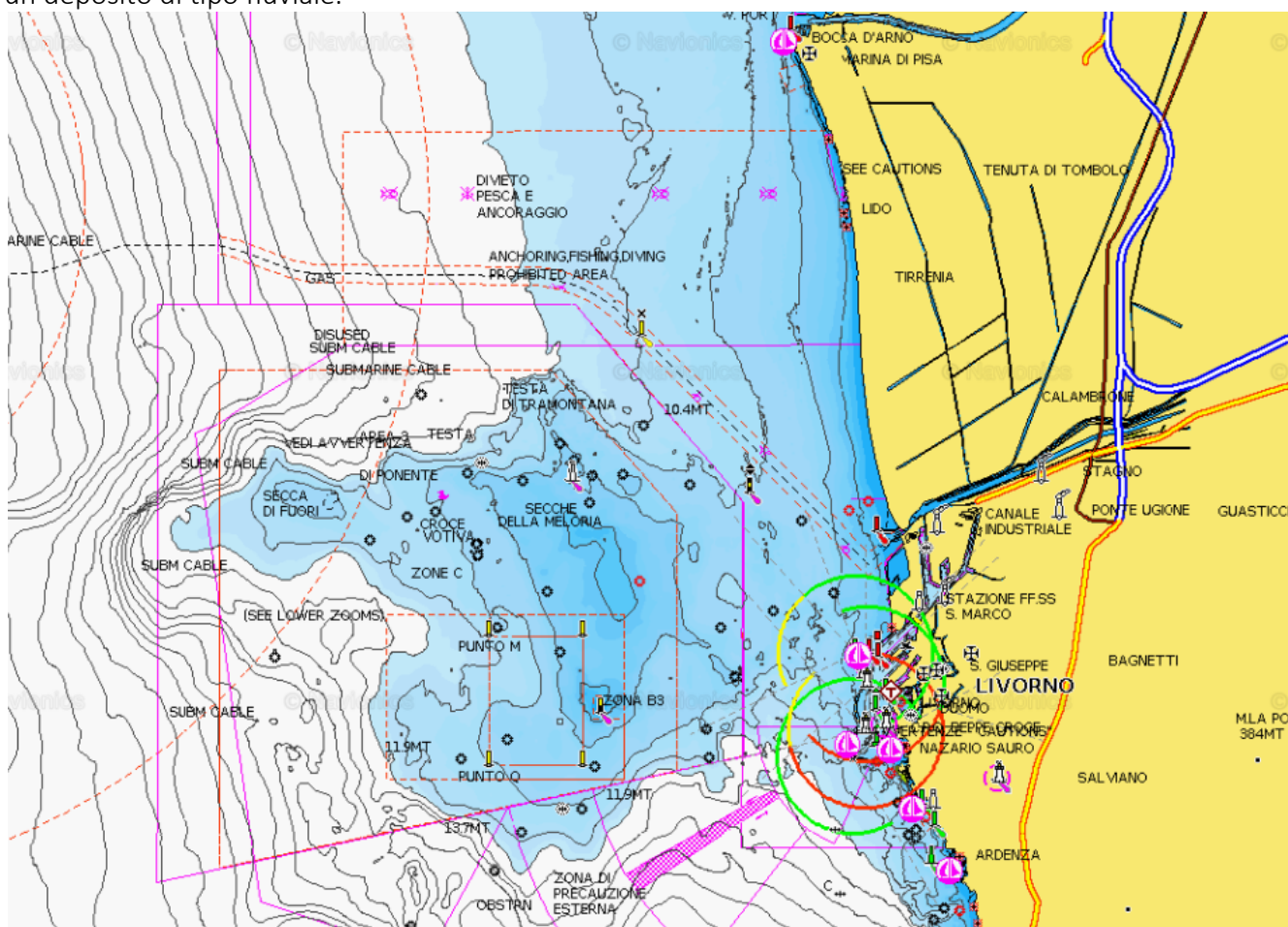


Figura 2.4 - Stralcio della carta nautica nel tratto di interesse

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

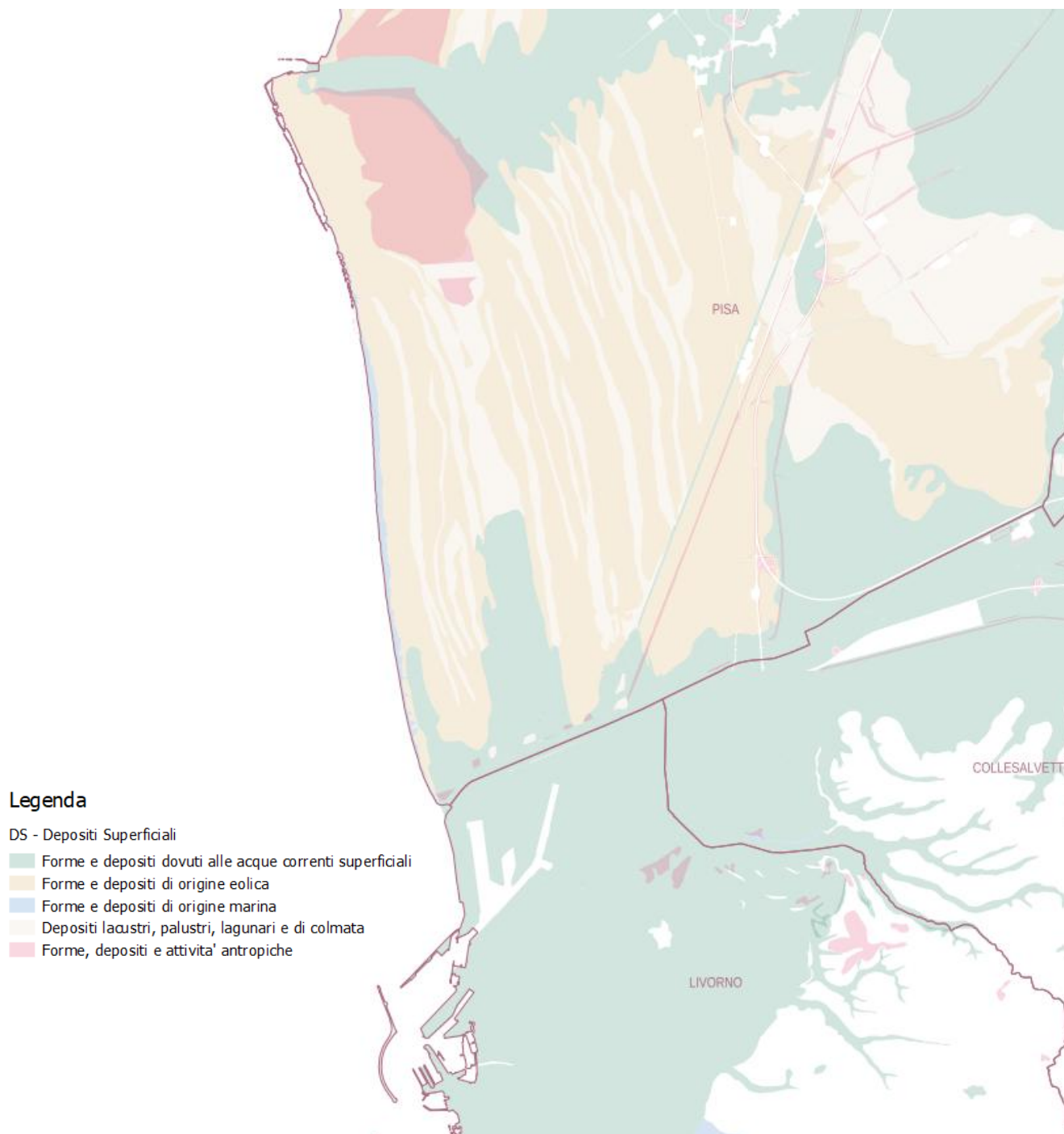


Figura 2.5 - Stralcio della carta geomorfologica della Toscana

Tra gli elementi morfologici peculiari si possono distinguere corpi sabbiosi allungati (lidi), dotati di una limitata elevazione rispetto alla piana circostante, che corrispondono ad originarie barre di spiaggia sottomarine, emerse per l'alimentazione ricevuta dalle correnti di deriva litoranea e dal moto ondoso. Vi sono inoltre le dune, sempre a composizione sabbiosa, caratterizzate da quote nettamente più elevate e che presentano una forma più irregolare, con un andamento indipendente da quello della linea di riva in quanto vengono originate dall'azione del vento che le alimenta.

L'emersione delle barre comporta la delimitazione di un tratto di mare retrostante, che progressivamente tende a colmarsi per la deposizione del materiale tendenzialmente più fine

<b>Progetto:</b> Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	<b>Livello progettazione:</b> Progetto di fattibilità tecnico economica	<b>Elaborato:</b> IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-002_0.docx
---	--	--

proveniente dal fiume vicino o trasportato dal vento dalla barra antistante. In tali zone si venivano così a formare depressioni palustri (lame) che tendono progressivamente ad interrarsi.

I lidi e le lame si presentano con un andamento allungato, tra loro parallelo, e sono disposti secondo quella che era la direzione della linea di riva al momento della relativa formazione.

I principali apparati dunali presenti, pur risultando stabilizzati da una copertura vegetale arbustiva ed erbacea che li protegge dall'azione erosiva del vento, appaiono in evidente fase erosiva. L'arretramento della linea di riva li sta infatti esponendo all'attacco del moto ondoso, che erode al piede le dune a mare e ne determina il progressivo smantellamento.

A seguito della diminuzione dei quantitativi di materiale solido trasportati dal fiume, il mare ha iniziato, a partire dalla fine della metà dell'800, il progressivo smantellamento dell'apparato deltizio dell'Arno. Tra le cause che stanno determinando l'erosione del litorale pisano si possono individuare anche la graduale subsidenza delle aree di pianura e l'innalzamento del livello del mare, due fattori che provocano l'accentuazione dei processi erosivi.

I depositi della pianura pisana, costituiti da forti spessori di sedimenti molto compressibili limoso-argillosi ed anche torbosi, sono soggetti a progressiva consolidazione per effetto dei carichi litostatici, delle variazioni dei livelli piezometrici (per effetto degli emungimenti) e dei carichi antropici. Ciò determina il graduale abbassamento (subsidenza) delle terre emerse e dei fondali rispetto al livello medio del mare.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

## 2.4 Descrizione dello stato dei luoghi

Al fine di poter ottenere una più approfondita conoscenza dei luoghi oggetto di interesse è stato accuratamente pianificato ed eseguito un sopralluogo dell'area, durante il quale sono state acquisite foto e rilevate le situazioni critiche o singolari; tali informazioni verranno utilizzate per la comprensione delle dinamiche costiere, per la successiva modellazione e infine per l'individuazione dei più adeguati interventi nell'ambito delle sinergie progettuali previste.

Il sopralluogo è stato eseguito in data 9 e 10 Ottobre 2019 ed ha interessato tutto il litorale compreso tra il canale Scolmatore e il Fiume Arno. Di seguito, nei successivi paragrafi, si riporta una descrizione delle risultanze di tale sopralluogo e un report fotografico dello stato attuale dei luoghi.

### 2.4.1 Litorale di Calambrone

Il litorale di Calambrone si sviluppa tra il canale Scolmatore e i Bagni Folgore, per una lunghezza complessiva pari a circa 3.5 km. Partendo dall'armatura di foce in destra idrografica del canale Scolmatore e procedendo verso Nord si incontra immediatamente un tratto di litorale di lunghezza pari a circa 400 m caratterizzato da un'ampia spiaggia sabbiosa, con larghezza variabile tra 200 m (a Sud, dove è stato fatto il ripascimento con il materiale dragato dalla foce dello Scolmatore, Figura 2.7) e 50 m (a Nord).

Procedendo verso Nord, inizia un tratto di litorale caratterizzato dalla presenza di numerose strutture ricettive a fini turistico-balneari. In particolare, nei primi 200 m, si incontrano numerose strutture appartenenti agli stabilimenti balneari che si protendono sulla spiaggia e che in alcuni punti giungono quasi a lambire la linea di riva (Figura 2.8). In questo tratto di litorale (300 m), la fascia retrostante la spiaggia risulta completamente urbanizzata.

Nel tratto successivo più a Nord, la fascia litoranea è caratterizzata da una spiaggia sabbiosa di ampiezza variabile (mediamente 50 m), con retrostante apparato dunale ricoperto da vegetazione avente ampiezze fino a 100 m (Figura 2.9, Figura 2.10, Figura 2.11 e Figura 2.12).

Questo tratto di litorale, che ha una lunghezza pari a circa 2.5 km e che si sviluppa indicativamente fino ai Bagni Folgore, rappresenta la maggior parte del litorale di Calambrone ed è caratterizzato dalla presenza di numerosi stabilimenti balneari che conservano le strutture principali in posizione retrostante all'apparato dunale e mantengono nella zona di spiaggia solo alcune strutture isolate quali chioschi e locali adibiti a ristorazione.

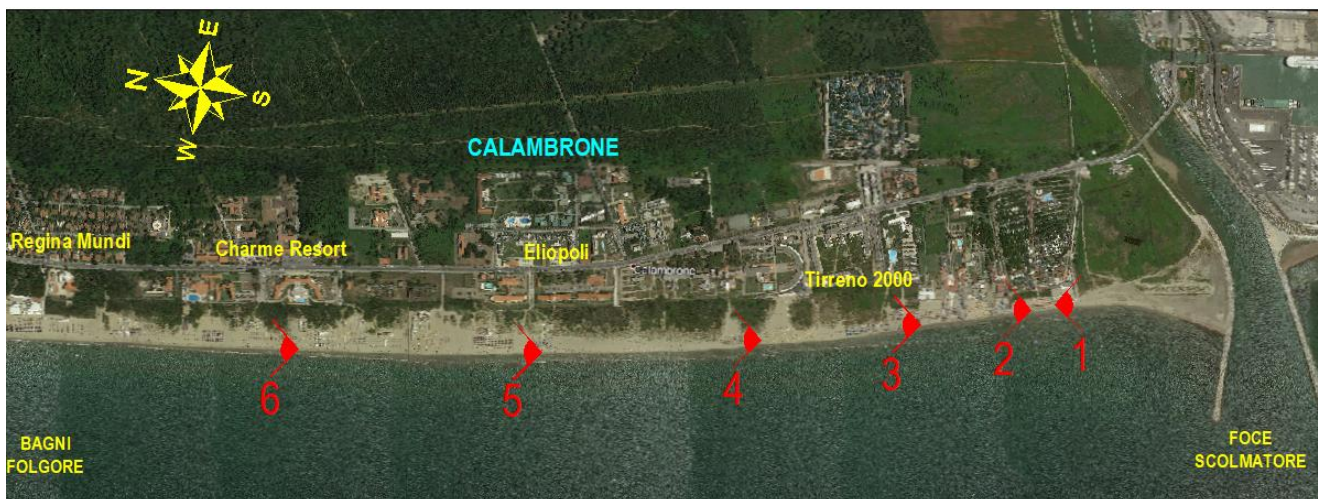


Figura 2.6-Punti di scatto eseguiti nel tratto di litorale di fronte a Calambrone



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



Figura 2.7 - Foto 1: Spiaggia di fronte a Camping Mare e Sole – vista verso Sud



Figura 2.8 - Foto 2: Spiaggia di fronte a Camping Mare e Sole – vista verso Nord

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



Figura 2.9 - Foto 3: Spiaggia di fronte a Oasi del Mare – vista verso Nord



Figura 2.10 - Foto 4: Spiaggia di fronte a Regina del Mare – vista verso Nord



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



*Figura 2.11 - Foto 5: Spiaggia di fronte a Bagno La Siesta – vista verso Nord*



*Figura 2.12 - Foto 6: Spiaggia di fronte a Toscana Charme Resort – vista verso Nord*

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

## 2.5 Litorale di Tirrenia

Il tratto di litorale di Tirrenia si sviluppa indicativamente tra i Bagni Folgore e l'inizio delle scogliere in prossimità del Bagno Lido, per una lunghezza complessiva pari a circa 3.5 km.

Procedendo verso Nord, oltre i Bagni Folgore, si osserva una rilevante variazione nella distribuzione delle strutture balneari sulla fascia litoranea. Nel dettaglio si osserva che l'urbanizzazione ha riguardato la fascia più prossima alla spiaggia relegando la fascia dunale, ricoperta di vegetazione, nell'area compresa tra gli stabilimenti e la viabilità principale (SS24).

In questo tratto di lunghezza pari a circa 2 km si osserva quindi una maggior presenza di edifici e di strutture fisse sulla fascia di spiaggia che si protendono fino a pochi metri dalla linea di riva (vedi foto 7, 8 e 9, Figura 2.14, Figura 2.15 e Figura 2.16). In questo tratto la spiaggia ha un'ampiezza media di circa 60 m mentre la fascia dunale retrostante alle strutture ha un'ampiezza superiore a 100 m.

Procedendo verso Nord, nel tratto di spiaggia di fronte all'Oasi WWF "Dune di Tirrenia" si osserva, per un tratto di lunghezza pari a circa 1 km, una riduzione della presenza di strutture e un conseguente ampliamento della superficie di spiaggia che raggiunge in alcuni punti una larghezza pari a circa 100; anche la fascia dunale, che diventa Oasi WWF in questo tratto, è caratterizzata da una notevole ampiezza, fino a circa 300 m (foto 10, Figura 2.17).

Nel tratto più settentrionale del litorale di Tirrenia, oltre l'Oasi WWF e fino a Bagno Lido (per una lunghezza pari a circa 500 m), si osserva un progressivo aumento dell'antropizzazione della spiaggia con il ritorno di strutture fisse che si protendono fino quasi a lambire la linea di riva.

In questo tratto si osserva un progressivo assottigliarsi della fascia di spiaggia con conseguente riduzione della distanza tra la linea di riva e le strutture presenti sulla spiaggia (foto 11 e 12, Figura 2.18 e Figura 2.19).

Questo tratto rappresenta l'ultimo tratto di litorale che ad oggi risulta essere stabile senza necessità di essere difeso con opere rigide. A nord di questo tratto iniziano infatti le prime strutture di difesa del litorale (pennelli e barriere).



Figura 2.13 - Punti di scatto eseguiti nel tratto di litorale di fronte a Tirrenia



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



Figura 2.14 - Foto 7: Spiaggia di fronte a Lido del Finziere – vista verso Nord



Figura 2.15 - Foto 8: Spiaggia di fronte a Bagni Delfino – vista verso Nord

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



Figura 2.16 - Foto 9: Spiaggia di fronte a Oasi del Mare – vista verso Nord



Figura 2.17 - Foto 10: Spiaggia di fronte a Regina del Mare – vista verso Nord



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



Figura 2.18 - Foto 11: Spiaggia di fronte a Bagno La Siesta – vista verso Nord



Figura 2.19 - Foto 12: Spiaggia di fronte a Toscana Charme Resort – vista verso Nord

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

## 2.6 Litorale di Marina di Pisa

Il tratto di litorale di Marina di Pisa si sviluppa tra il Bagno Lido e la Foce dell'Arno, per una lunghezza complessiva pari a circa 4 km.

Questo tratto di litorale nell'ultimo secolo è stato caratterizzato da una forte erosione con arretramento della linea di riva a cui si è cercato di rimediare attraverso la realizzazione di scogliere fin dal 1898. Con la realizzazione di tali scogliere l'arretramento si è aggravato e spostato verso Sud, rendendo necessaria la realizzazione di un sistema pressoché continuo di barriere emerse e sommerse fino al limite Nord del litorale di Tirrenia.

Immediatamente a Nord dell'Oasi WWF "Dune di Tirrenia" si rilevano le prime strutture di difesa, costituite da un pennello e da una barriera sommersa in massi (foto 13 e 14, Figura 2.21 e Figura 2.22); in questo tratto la spiaggia risulta ancora continua e regolare.

Procedendo verso Nord si incontrano una serie di piccole barriere in massi poste a breve distanza una dall'altra, molto ravvicinate alla costa e che hanno portato alla formazione di una fascia di spiaggia caratterizzata da una serie di tomboli e da una curvatura accentuata della linea di riva (foto 15, 16 e 17, Figura 2.23, Figura 2.24 e Figura 2.25). In questo tratto di litorale, di lunghezza pari a circa 1.5 km, l'ampiezza della spiaggia esistente tra le barriere e gli edifici presenti risulta essere piuttosto ridotta con larghezze comprese tra pochi metri e 10÷20 m.

Procedendo verso Nord, tra il Circolo Tennis Litorale Pisano e Piazza Sardegna (circa 700 m) si incontra un diverso e più esteso sistema di difesa della costa costituito da pennelli e barriere emerse in massi poste a circa 90 m dalla linea di costa. Tale distanza ha permesso di evitare la formazione dei tomboli ma non ha permesso di contrastare efficacemente l'erosione che ha praticamente annullato la spiaggia in questo tratto, rendendo anche necessario la realizzazione di una scogliera radente a protezione della strada (foto 18, Figura 2.26).

Più a Nord, tra Piazza Sardegna e Piazza delle Baleari (circa 1 km) si sviluppa un più complesso sistema di difesa del litorale a celle, costituito da pennelli di lunghezza pari a circa 50 m, posti a circa 250 m di distanza tra loro, e da barriere semiaffioranti (foto 19 e 20, Figura 2.27 e Figura 2.28). All'interno delle celle è stata versata ghiaia grossolana e ricostruita una spiaggia con ampiezza dell'ordine dei 20 m che è risultata abbastanza stabile.

Il tratto più settentrionale del litorale fino all'imboccatura del Porto di Pisa (circa 600 m) è caratterizzato dalla presenza di barriere, pennelli e scogliere radenti e dalla quasi completa assenza di spiaggia ad eccezione del tratto a ridosso dell'imboccatura portuale (foto 21 e 22, Figura 2.29 e Figura 2.30)



Figura 2.20 - Punti di scatto eseguiti nel tratto di litorale di fronte a Marina di Pisa



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



Figura 2.21 - Foto 13: Spiaggia di fronte a Bagno Lido – vista verso Sud



Figura 2.22 - Foto 14: Spiaggia di fronte a Bagno Lido – vista verso Sud

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



Figura 2.23 - Foto 15: Spiaggia di fronte a Bagno Lido – vista verso Nord



Figura 2.24 - Foto 16: Spiaggia di fronte a Camping Internazionale – vista verso Nord



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



Figura 2.25 - Foto 17: Spiaggia di fronte a Pia Para Ti – vista verso Nord

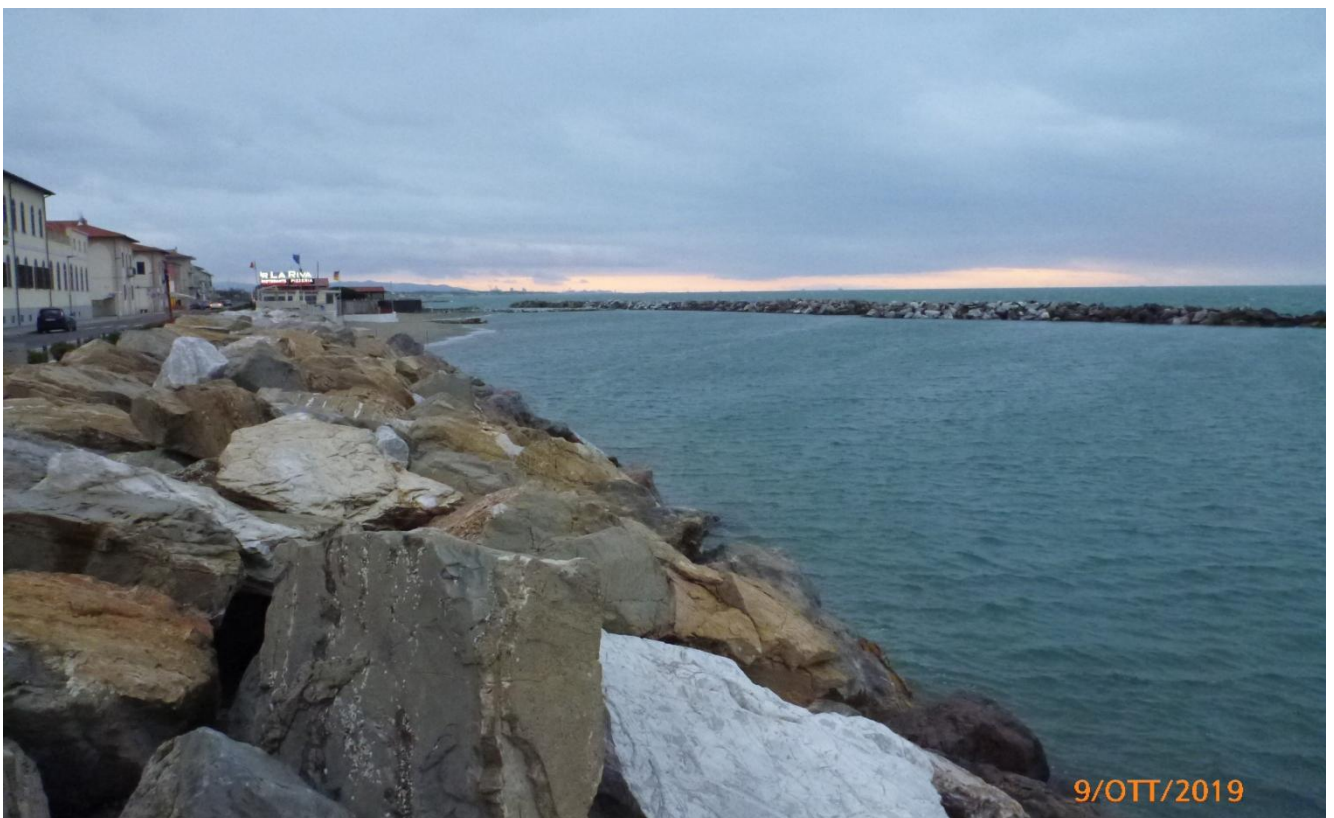


Figura 2.26 - Foto 18: Spiaggia di fronte a via E.Masca – vista verso Sud

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



Figura 2.27 - Foto 19: Spiaggia tra il primo e il secondo pennello (partendo da Sud) – vista verso Sud



Figura 2.28 - Foto 20: Terrazza Pontecorvo – vista verso Nord



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

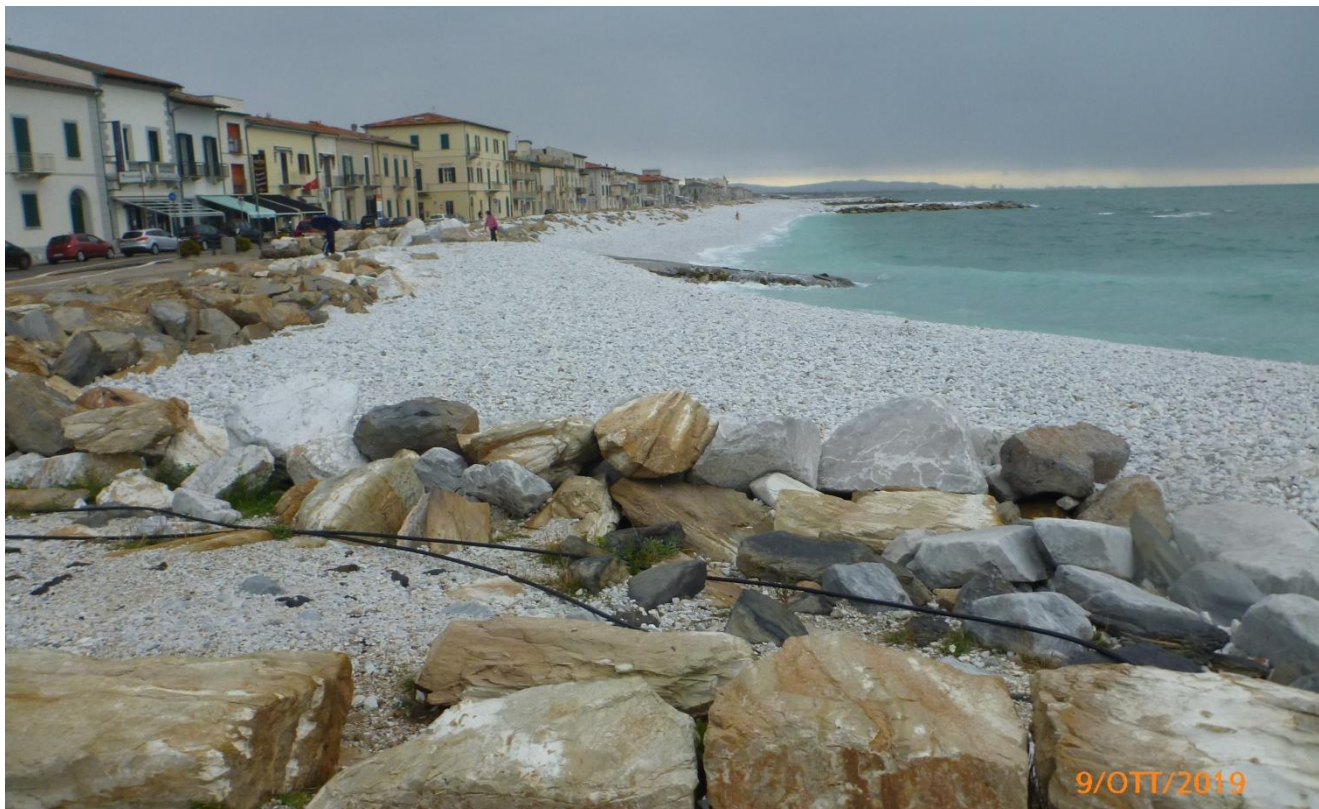


Figura 2.29 - Foto 21: Terrazza Pontecorvo – vista verso Sud



Figura 2.30 - Foto 22: Foto da imboccatura Porto di Livorno – vista verso Sud

### 3 EVOLUZIONE STORICA DEL LITORALE TRA FOCE ARNO E IL PORTO DI LIVORNO

#### 3.1 Sintesi degli studi pregressi

Per comprendere la dinamica evolutiva del litorale tra foce Arno e il porto di Livorno, va innanzitutto inquadrato il comportamento generale della costa toscana.

La costa della Toscana risulta da tempo sottoposta a profonde modifiche morfologiche conseguenti a fenomeni erosivi che hanno determinato la progressiva riduzione della spiaggia emersa, l'arretramento della linea di riva e l'abbassamento dei fondali antistanti il litorale. Tali processi sono imputabili sia a fattori di scala globale, quale l'innalzamento generalizzato del livello del mare, sia alla riduzione degli apporti sedimentari immessi presso le foci dei maggiori corsi d'acqua, sia alla subsidenza della pianura legata alla compattazione dei sedimenti recenti, sia ad interventi antropici di varia natura (Casarosa, 2007).

L'unità fisiografica di riferimento per il tratto di litorale tra la foce del fiume Arno e il porto di Livorno è rappresentata nella Figura 3.1. Influenzata quasi esclusivamente dall'apporto dei sedimenti provenienti dal fiume Arno e in minor misura da quelli provenienti dal Serchio, la linea di riva raggiunse il suo massimo protendimento verso mare intorno al 1850, quando Marina di Pisa non esisteva. Tale accrescimento ha avuto inizio dalla prima metà del 1600 periodo in cui la foce dell'Arno venne spostata verso Nord di 1,5 km comportando l'aumento del trasporto solido dovuto ad una maggiore pendenza dell'asta fluviale con conseguente rapida formazione del nuovo delta.

Dalla seconda metà del '800 in poi si instaurò un processo erosivo del delta, addirittura più veloce di quello di formazione; tale fenomeno si manifestò in modo diverso sulle due sponde. (Valerio Milano, Adb Arno, 1994).

In prima approssimazione si può affermare che i sedimenti provenienti dalla foce dell'Arno, e i sedimenti provenienti dallo smantellamento del suo delta, si distribuiscono lungo costa per effetto di un drift litoraneo diretto verso Nord, nel tratto Bocca d'Arno – Forte dei Marmi, e verso Sud nel tratto Bocca d'Arno – Livorno. Il quadro è più complesso per la zona della foce dello Scolmatore; in corrispondenza della spiaggia del Calambrone vi sarebbe una zona di convergenza dei drift che ne ha favorito la progradazione (Pranzini, 2003).

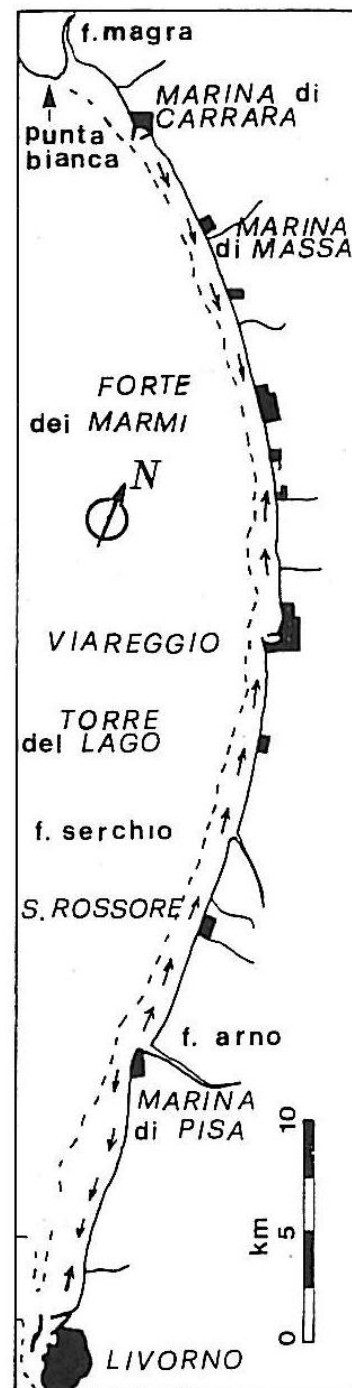


Figura 3.1- Caratteristiche morfologiche dell'unità fisiografica e direzioni del trasporto longitudinale

### 3.1.1 Evoluzione della linea di riva

Il litorale toscano è stato oggetto di particolare attenzione in relazione ai fenomeni evolutivi che lo hanno caratterizzato. La vasta documentazione storica disponibile consente di seguire con una certa accuratezza l'evoluzione del litorale a partire dal secolo XVI.

La Figura 3.2 (Mazzanti et al. 1990) presenta la ricostruzione delle linee di riva del litorale versiliese-pisano di età basso medievale e moderna fino al 1830 raffigurando la linea di riva tracciata sulla prima carta "geometricamente esatta" della Regione Toscana.

Nella successiva Figura 3.3 sono riportate le variazioni della linea di riva per gli anni 1881, 1931 e 1983; le variazioni sono state calcolate scegliendo come linea di riva di riferimento quella del 1846. Dal confronto si nota chiaramente come lo smantellamento del delta dell'Arno, dovuto al suo trasporto solito litoraneo, ha favorito l'accrescimento delle spiagge più prossime soggette all'influenza del fiume.

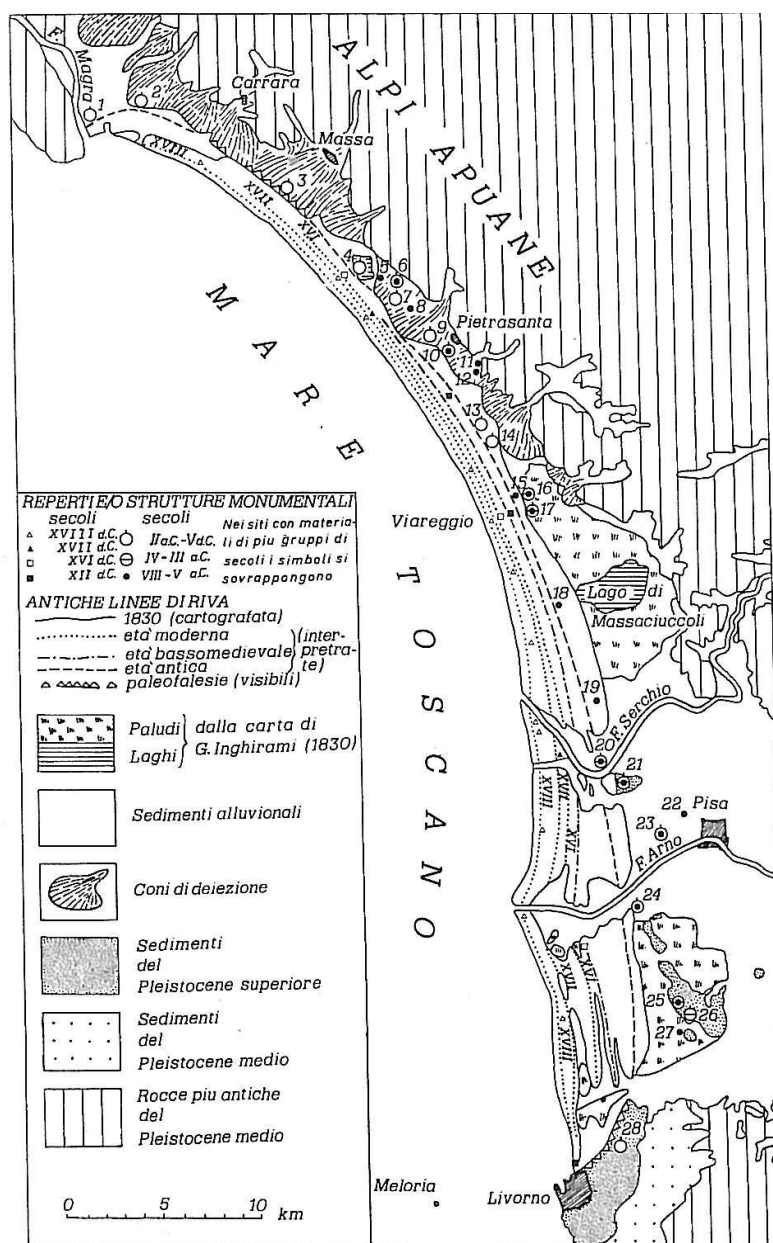


Figura 3.2 - Antiche linee di riva tra Livorno e Bocca di Magra in relazione ai siti archeologici più significativi

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

In dettaglio, la Figura 3.4 mostra l'evoluzione storica della linea di riva tra il porto di Livorno e la destra idraulica dell'Arno dal 1851 al 1983. Nella stessa figura è evidente la stabilizzazione del tratto di riva immediatamente a Sud della foce (sinistra idraulica dell'Arno) dagli anni '20 in poi: a seguito della imponente erosione del delta, l'abitato di Marina di Pisa venne protetto da opere di difesa a mare e radenti che, se da un lato hanno protetto l'abitato, dall'altro hanno contribuito ad intensificare il processo di erosione dell'intero arenile.

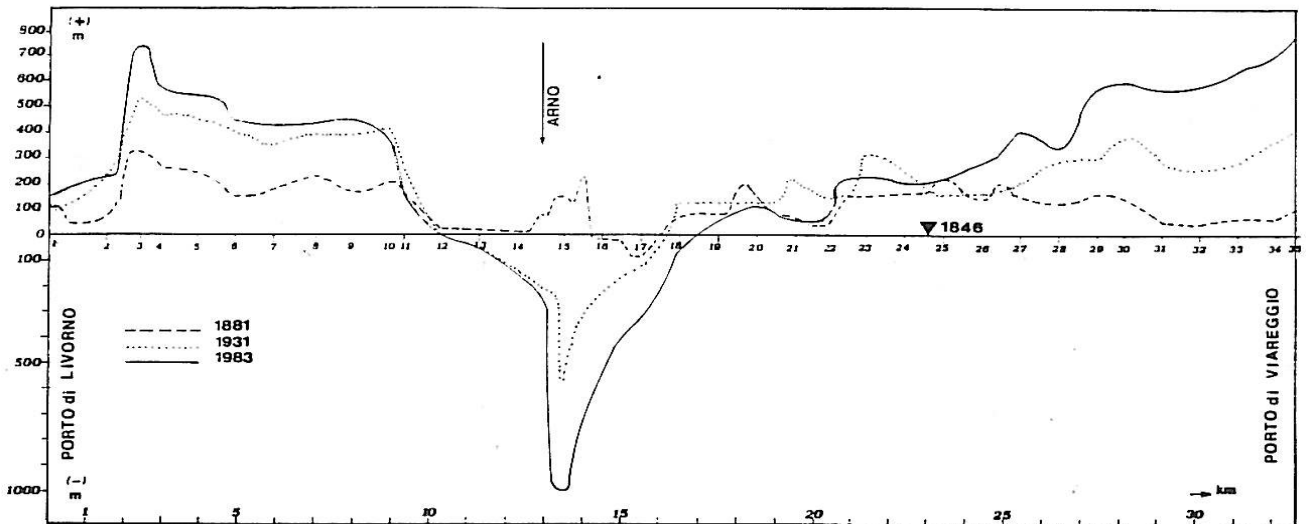


Figura 3.3 - Variazioni della linea di riva rispetto a quella del 1846 (quaderno n 3 – Adb Arno 1994)

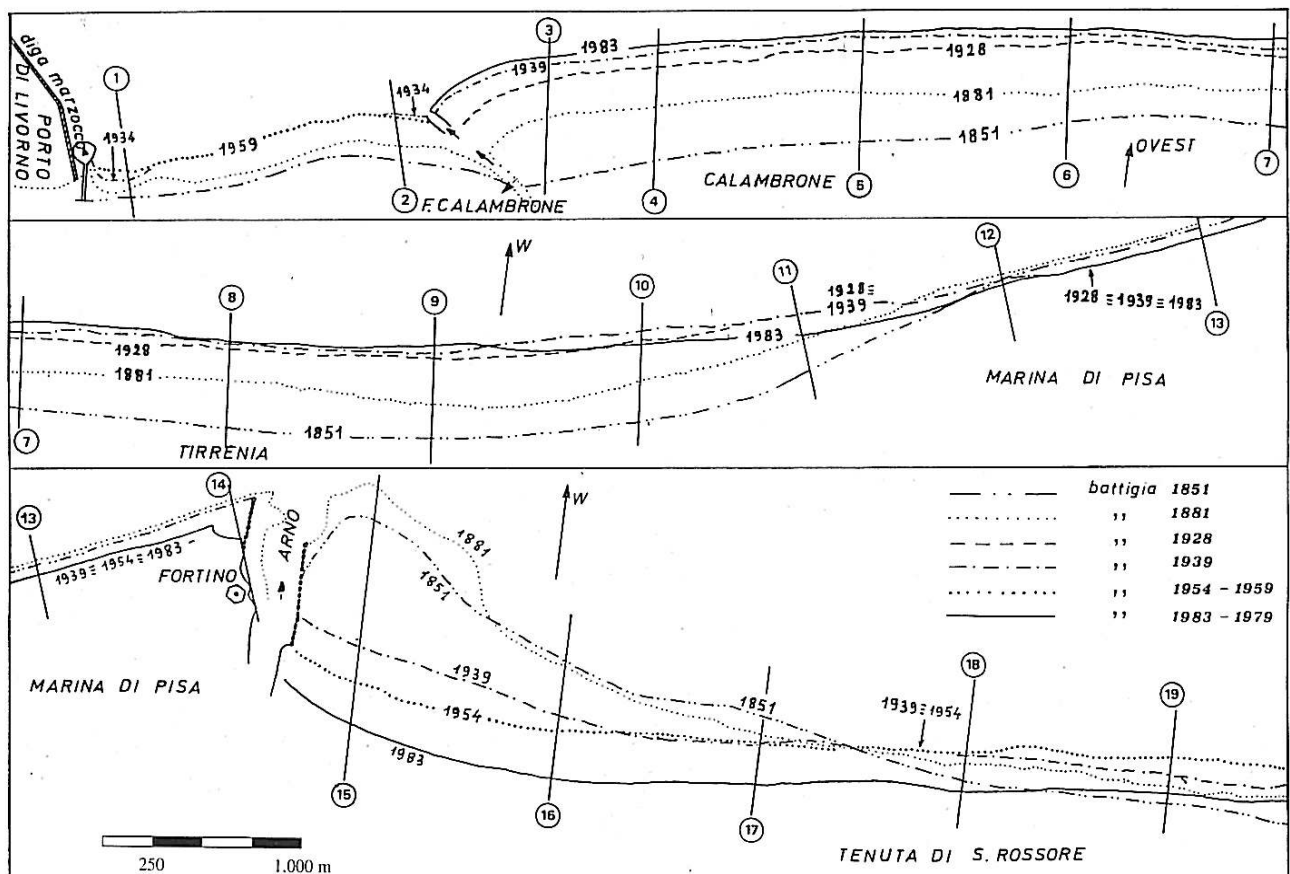


Figura 3.4 - Evoluzione storica della linea di battigia tra il porto di Livorno e la destra idraulica dell'Arno (quaderno n 3 – Adb Arno 1994)



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

I numerosi studi condotti per il litorale oggetto di interesse mostrano come l'evoluzione del tratto di costa, in termini di erosione e accrescimento, è diversificata nel tempo e nello spazio. Mediante il confronto di immagini aeree georeferenziate (Casarosa et al 2006), è stato possibile valutare le fluttuazioni della linea di riva del litorale pisano avvenute nel 20° secolo.

Di seguito, da Figura 3.6 a Figura 3.14 si riportano le variazioni areali di spiaggia dell'intero litorale dal 1938 al 2003 suddivise per intervalli cronologici, rappresentando i dati puntuali di ogni tratto; nelle figure sono indicate anche le posizioni delle opere di difesa con riferimento alla distanza dallo Scolmatore.

Raggruppando tutte le variazioni dei singoli tratti per i diversi periodi, si ottiene la variazione totale dell'area di spiaggia dal 1938 al 2004 mostrata nella successiva Figura 3.5, da cui risulta evidente l'accrescimento del tratto immediatamente a Nord del porto di Livorno e l'intensificazione dei fenomeni erosivi nelle aree limitrofe la foce del fiume Arno.

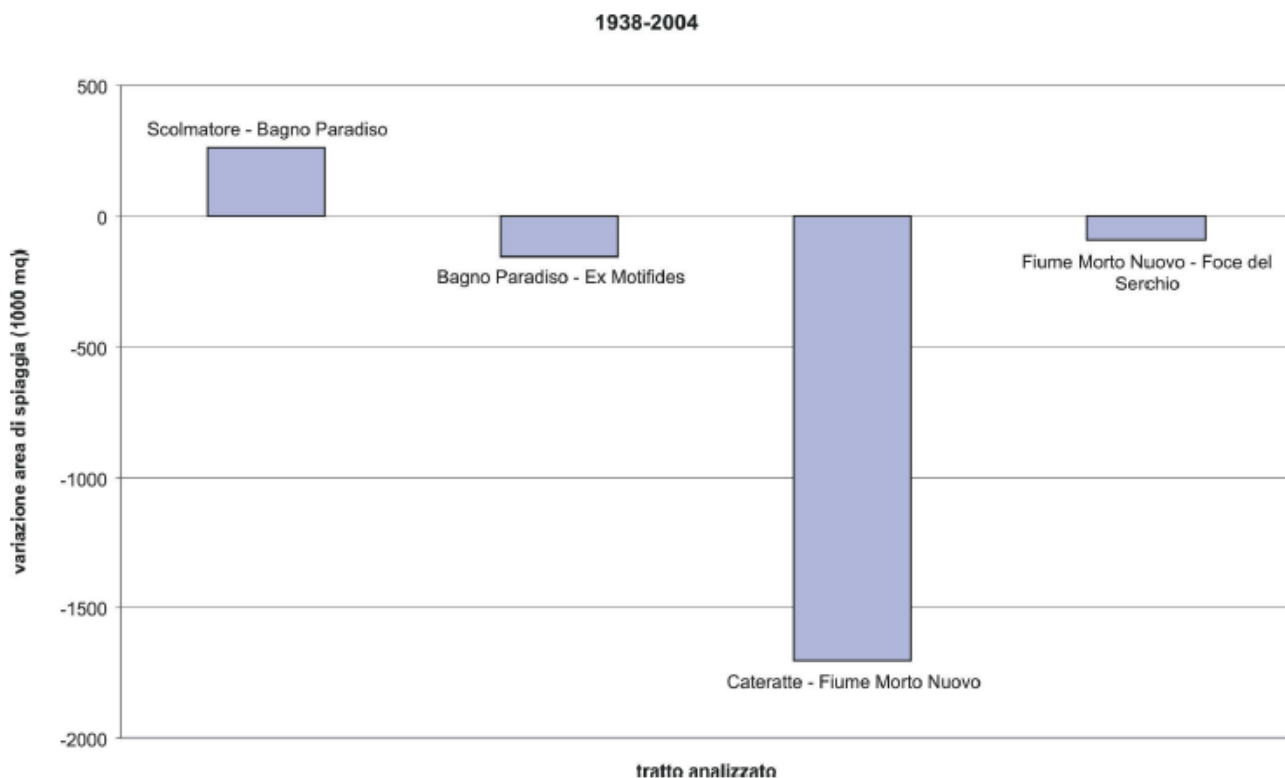


Figura 3.5 - Variazione totale dell'area di spiaggia dal 1938 al 2004 nei singoli tratti di costa

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

### 1938 - 1944

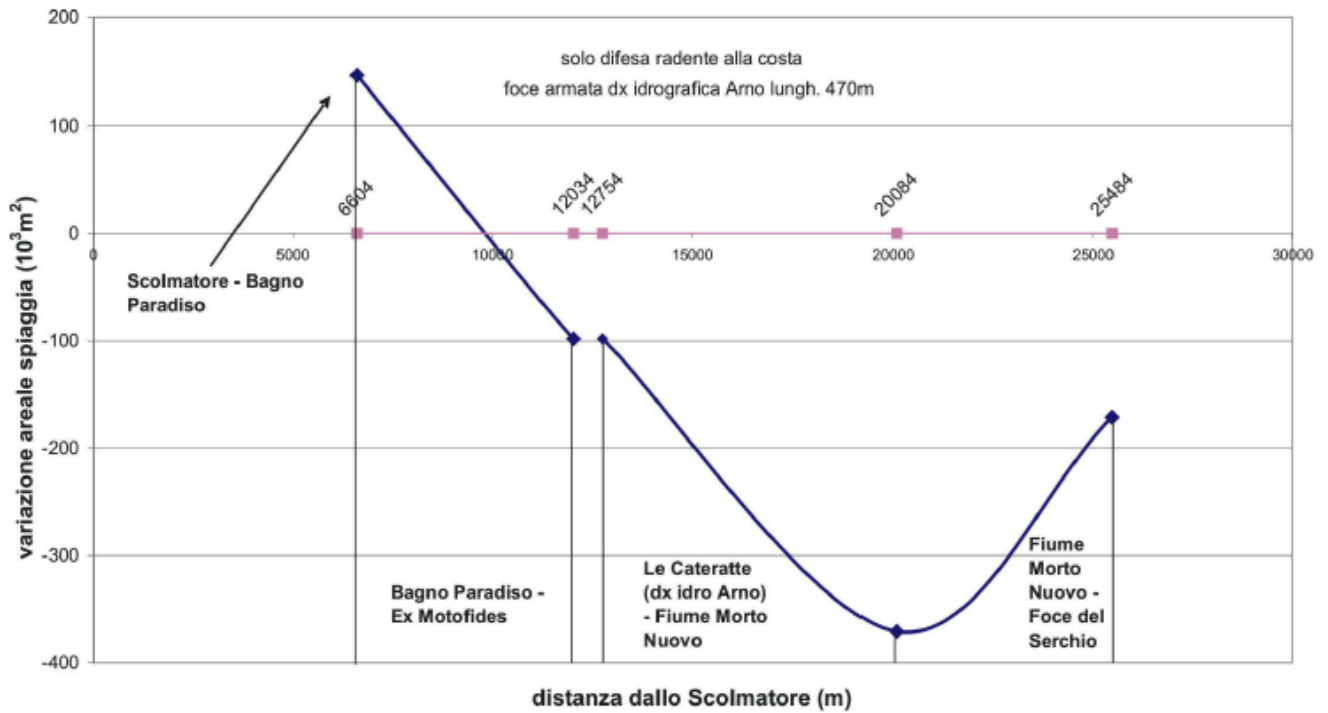


Figura 3.6 - Variazione areale di spiaggia dal 1938 al 1944

### 1944 - 1954

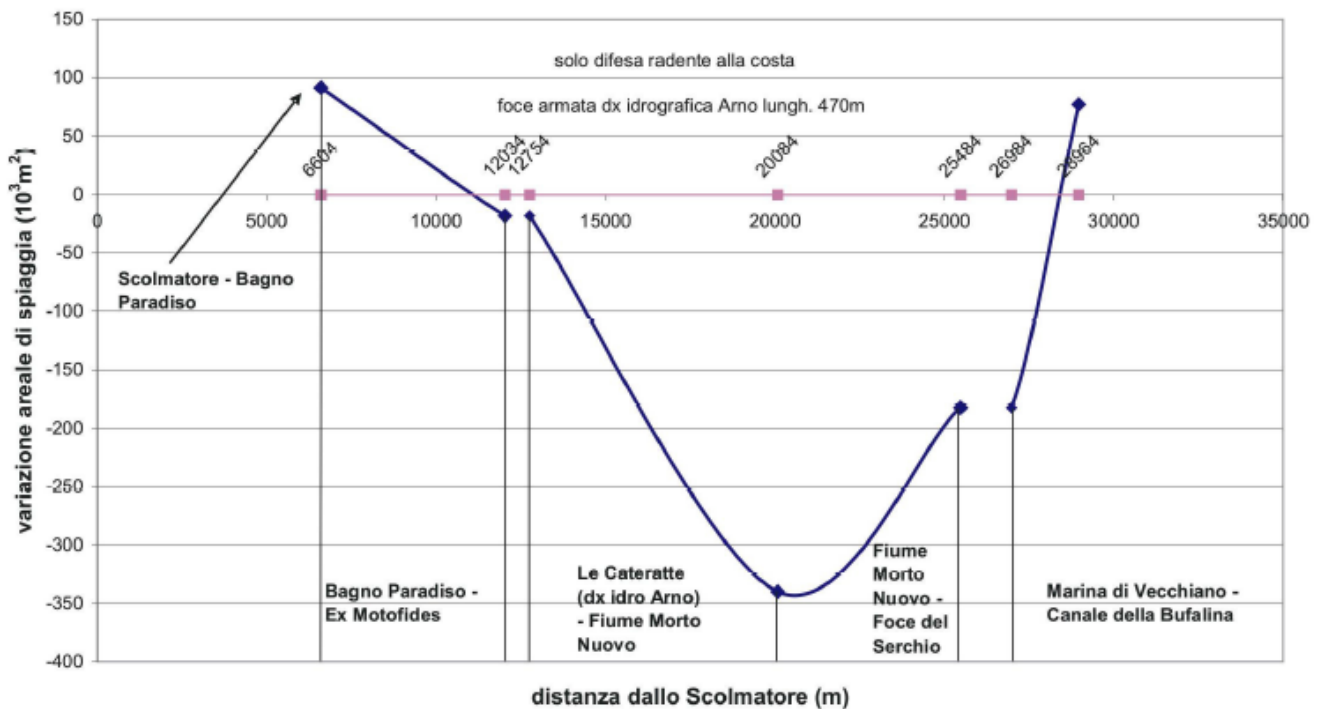


Figura 3.7 - Variazione areale di spiaggia dal 1944 al 1954

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

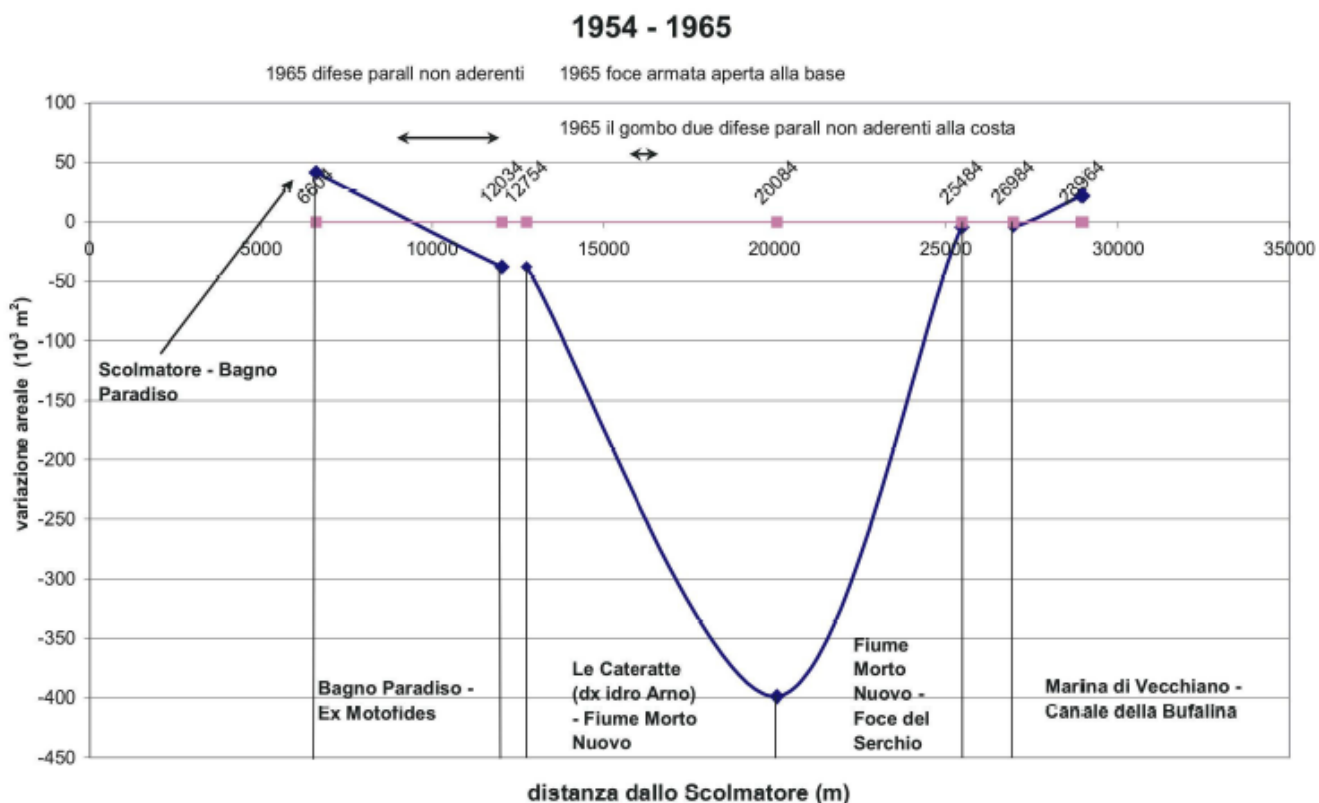


Figura 3.8 - Variazione areale di spiaggia dal 1954 al 1965

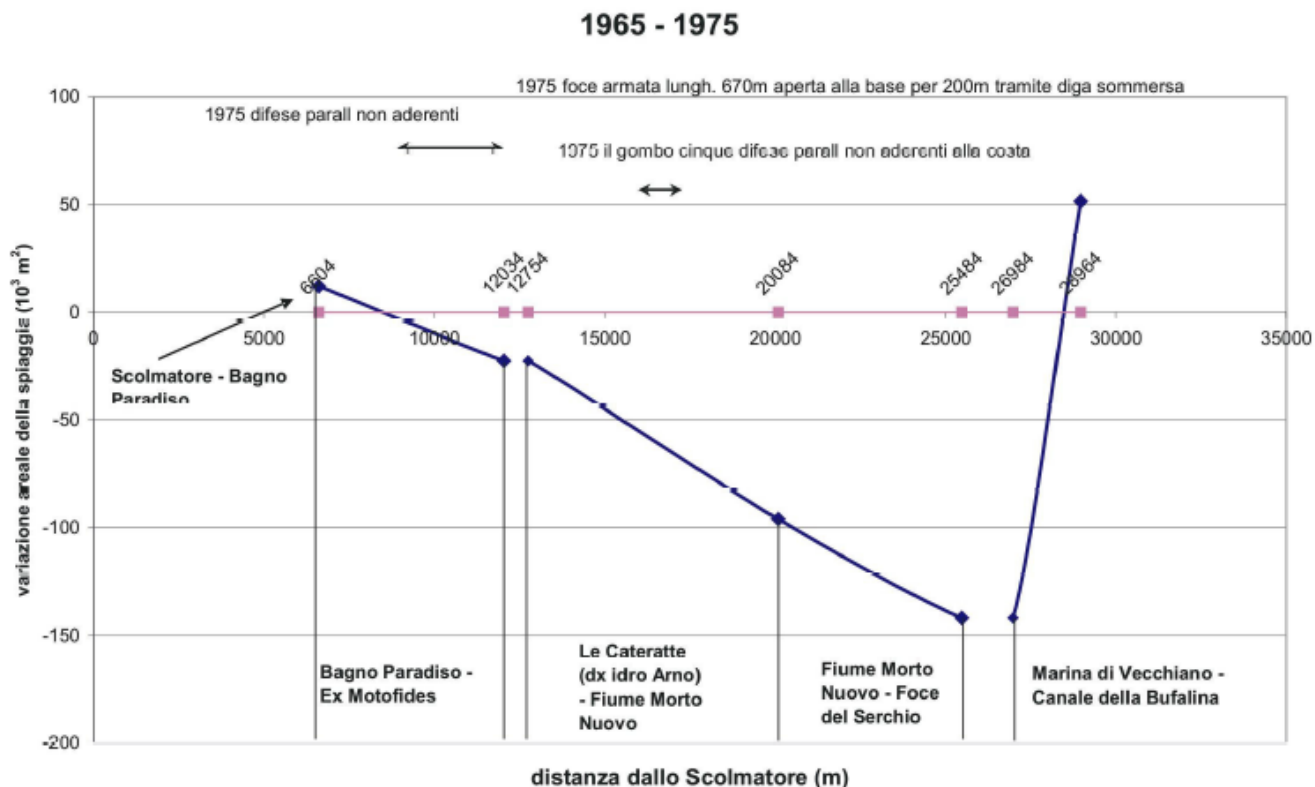


Figura 3.9 - Variazione areale di spiaggia dal 1965 al 1975

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

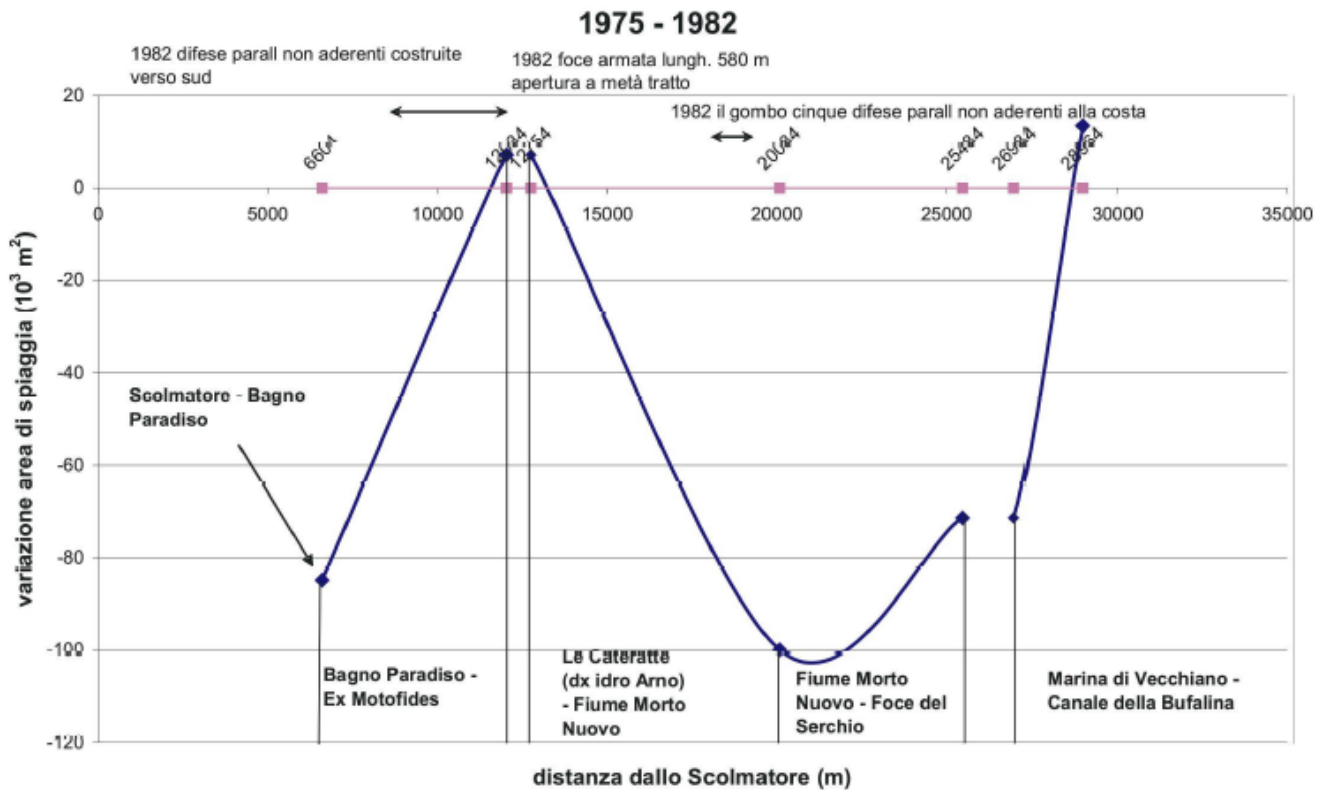


Figura 3.10 - Variazione areale di spiaggia dal 1975 al 1982

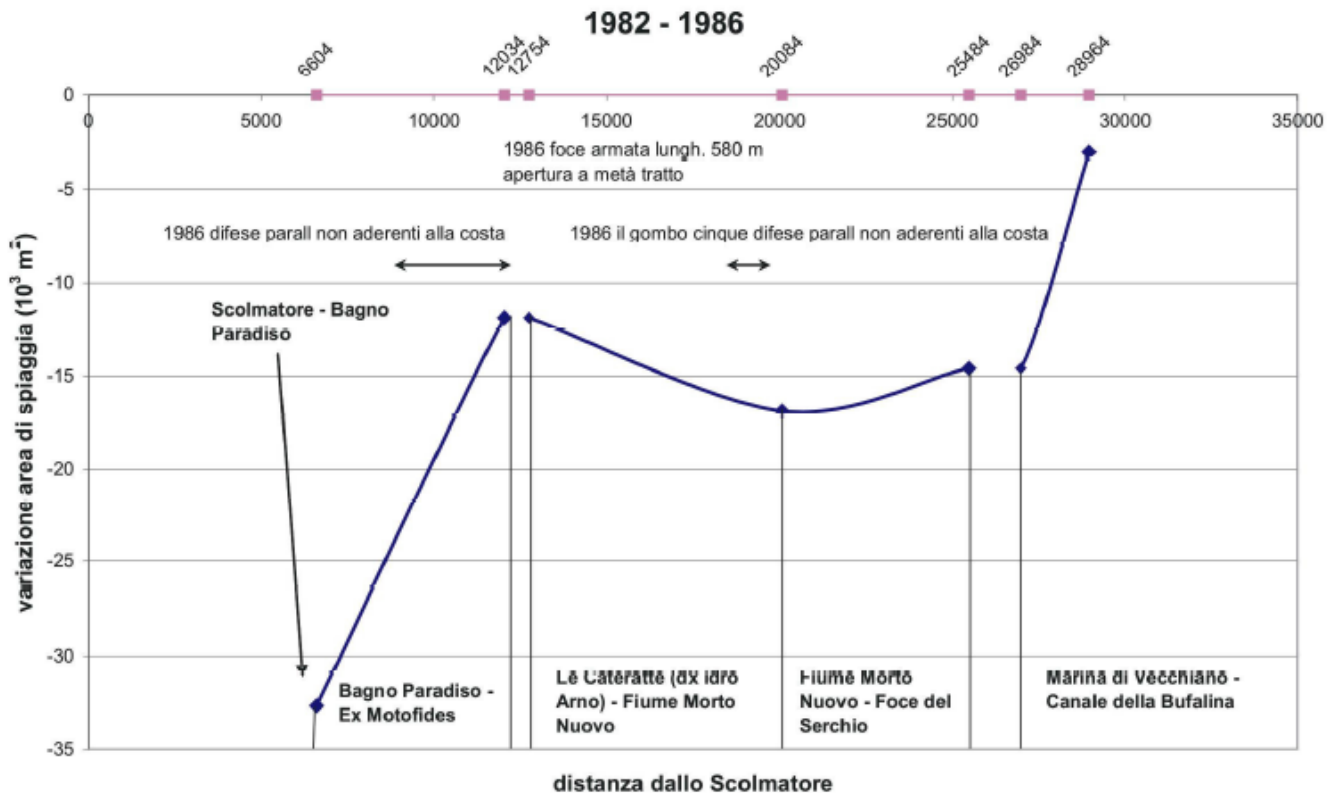


Figura 3.11 - Variazione areale di spiaggia dal 1982 al 1986

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

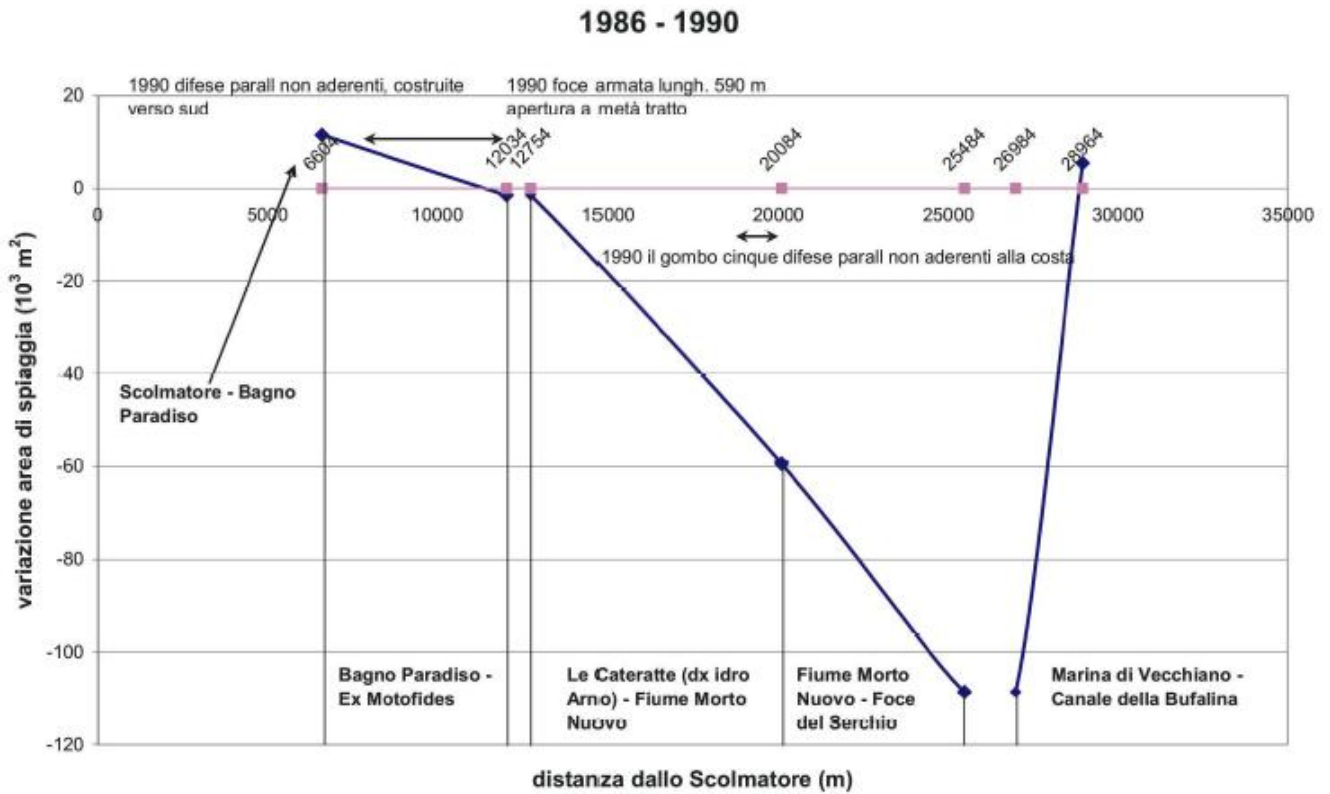


Figura 3.12 - Variazione areale di spiaggia dal 1986 al 1990

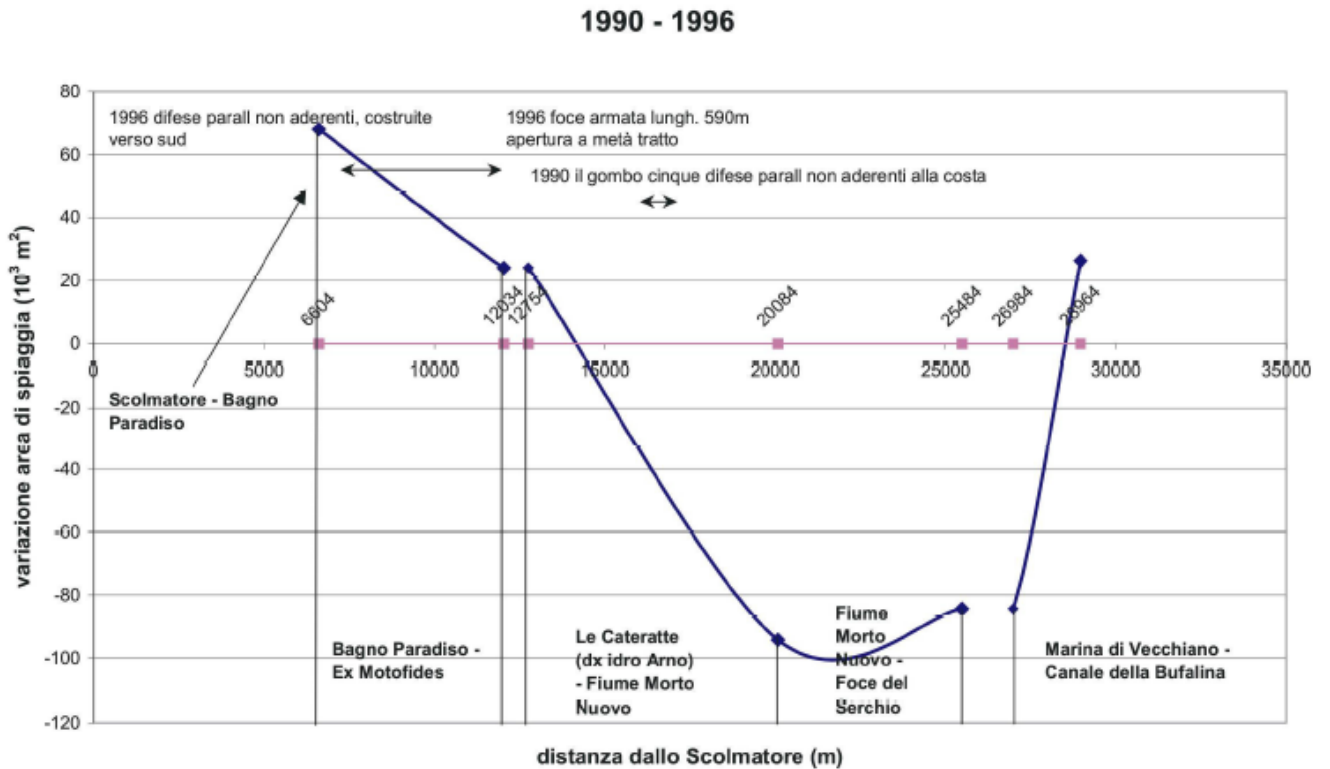


Figura 3.13 - Variazione areale di spiaggia dal 1990 al 1996

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

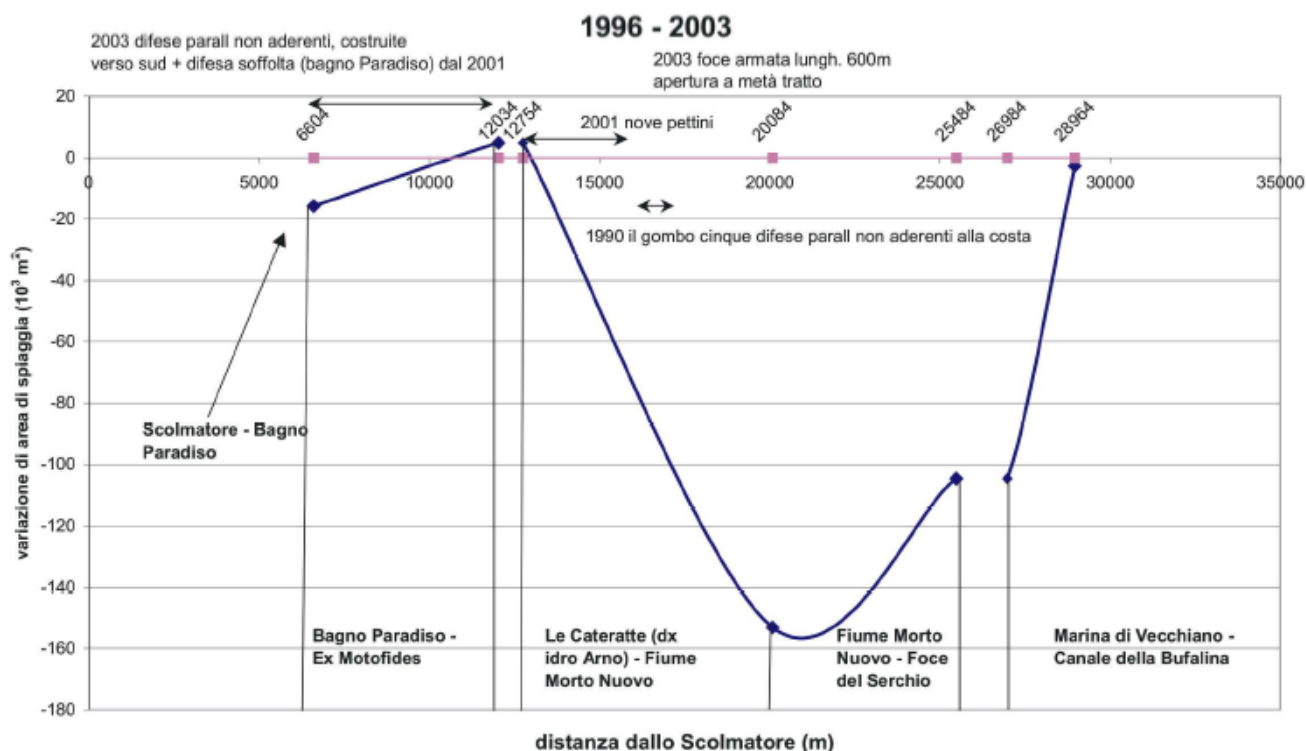


Figura 3.14 - Variazione areale di spiaggia dal 1996 al 2003

Lo studio di Pranzini (2003), che analizza le dinamiche per il tratto di litorale compreso tra il porto di Livorno e Tirrenia, mette in evidenza il tasso medio di spostamento (m/anno) nei 14 settori in cui è stato suddiviso il litorale, ognuno di lunghezza pari a circa 500 m. La Figura 3.15 riporta il periodo 1938 ÷ 1997 mentre la Figura 3.16 il periodo 1997 ÷ 2002. Nell'ultimo periodo di osservazione (1997 ÷ 2002) l'evoluzione della linea di riva ha mantenuto una certa costanza con gli andamenti storici registrati. Il tratto di costa che si estende dal porto di Livorno fino a Tirrenia mostra un avanzamento modesto della linea di riva mentre il tratto adiacente a Marina di Pisa, caratterizzato da una forte antropizzazione, rimane sostanzialmente invariato. Il litorale in destra idrografica del fiume Arno risulta invece interessato da un processo erosivo già avviato da tempo, con un raggio di azione sempre più esteso verso Nord.

Nella successiva Figura 3.17 si riportano i tassi di variazione annuale della linea di riva nel periodo più recente dal 2005 al 2018 (estratti dal rapporto LaMMA "Monitoraggio a scala regionale dell'evoluzione della linea di riva da remoto").

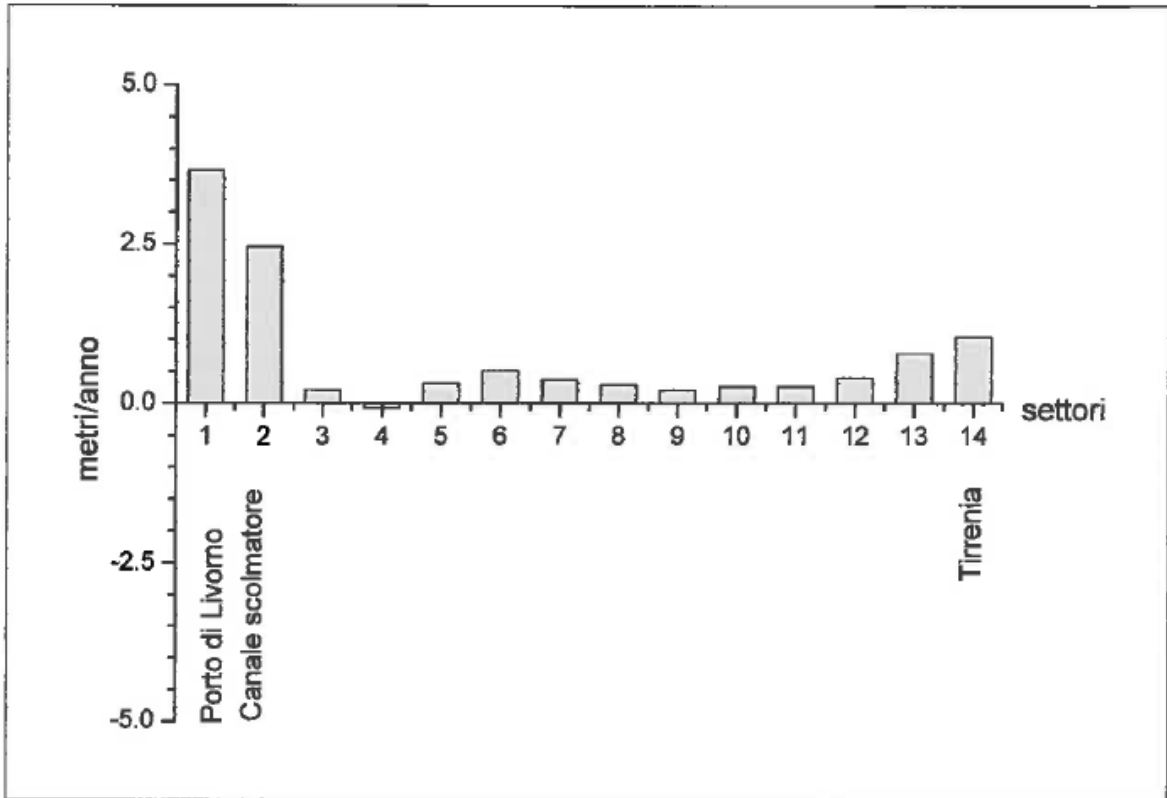


Figura 3.15 - Tasso medio di spostamento della linea di riva fra il 1938 e il 1997 nei 14 settori in cui è stato diviso il litorale

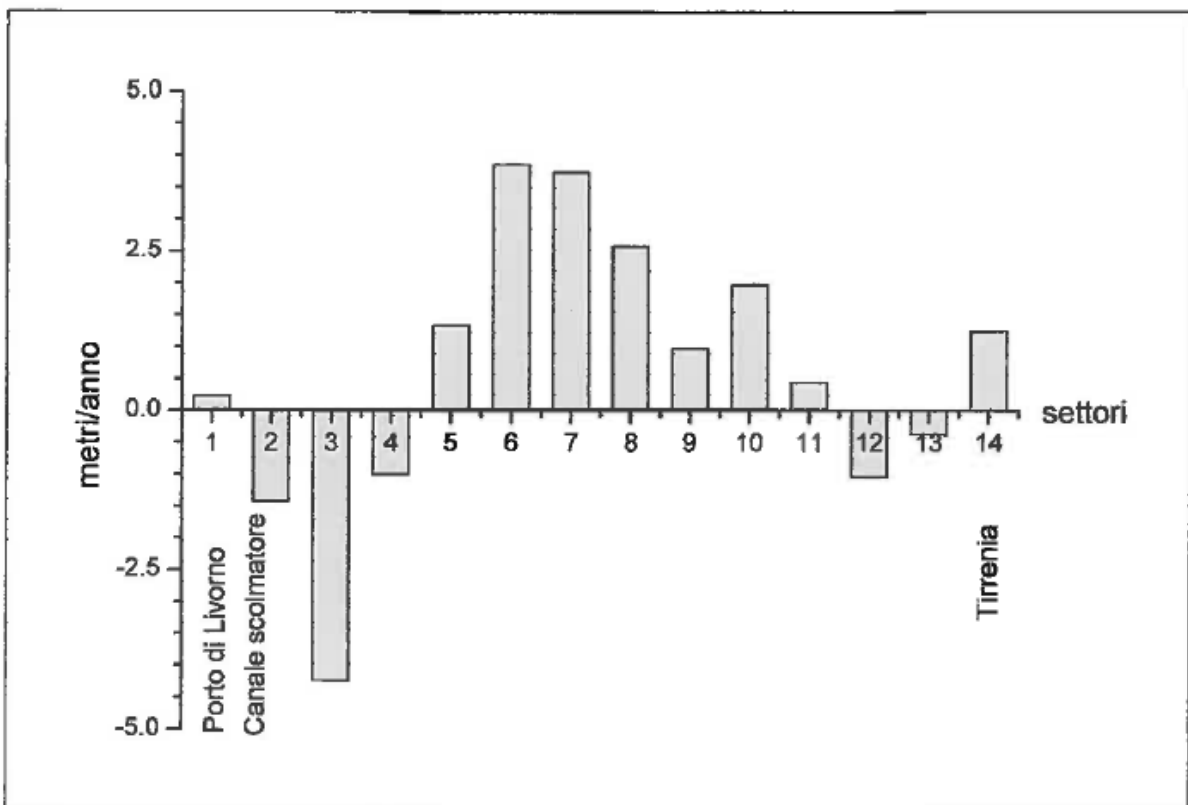


Figura 3.16 - Tasso medio di spostamento della linea di riva fra il 1997 e il 2002 nei 14 settori in cui è stato suddiviso il litorale

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

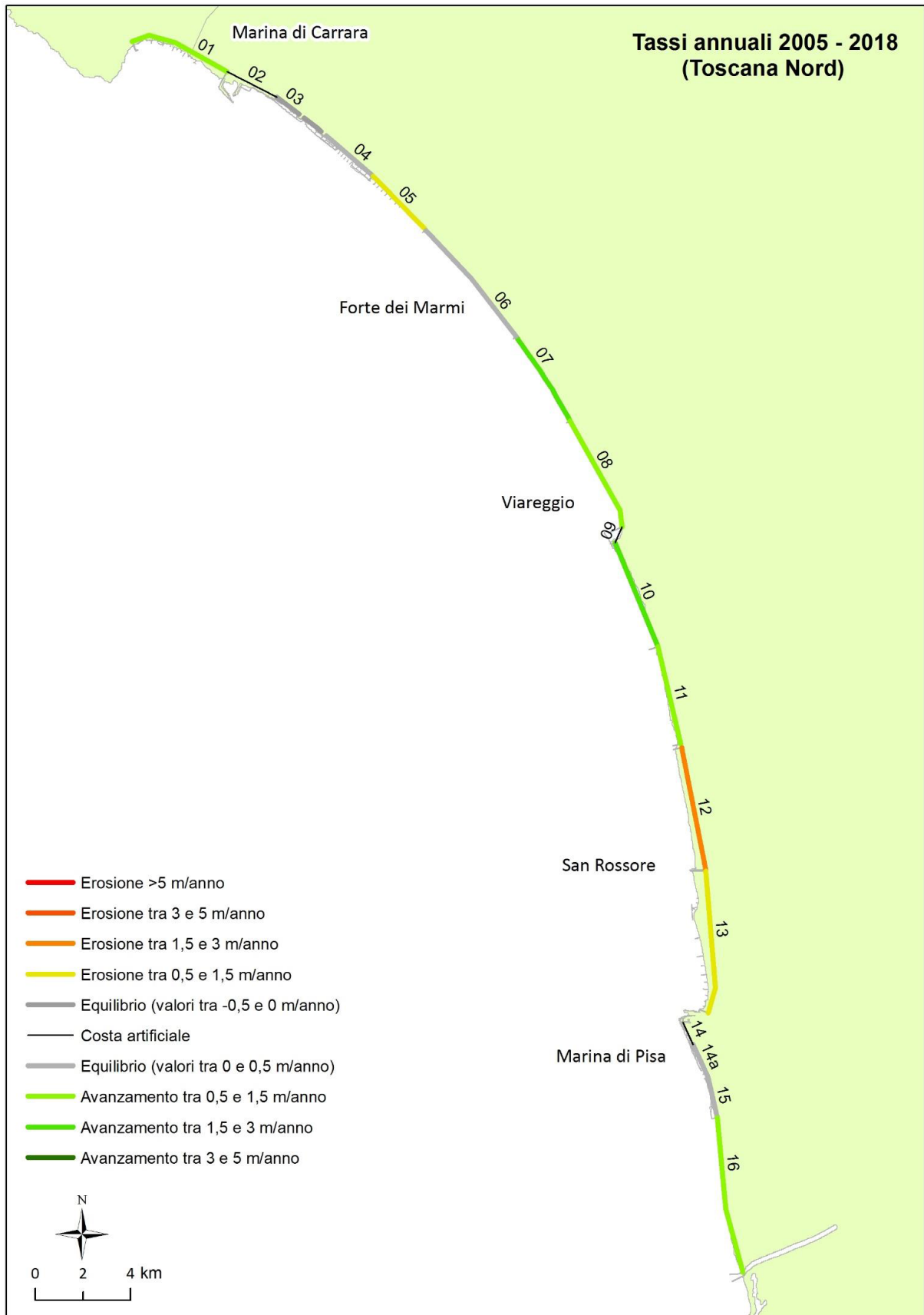


Figura 3.17 - Tassi di variazione annuale della linea di riva nel periodo 2005-2018 (Rapporto LaMMA)



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

Nelle successive figure (Figura 3.18, Figura 3.19 e Figura 3.20) si riporta invece il confronto delle linee di riva disponibili da rilievi eseguiti dalla Provincia di Pisa o ottenute da immagini satellitari (LaMMA), con riferimento ai periodi individuati negli studi citati in precedenza (Casarosa, 2006). Il litorale pisano da Marina di Pisa alla Foce dello Scolmatore è stato suddiviso in 3 tratti, procedendo da Nord verso Sud: Marina di Pisa, Tirrenia e Calambrone.

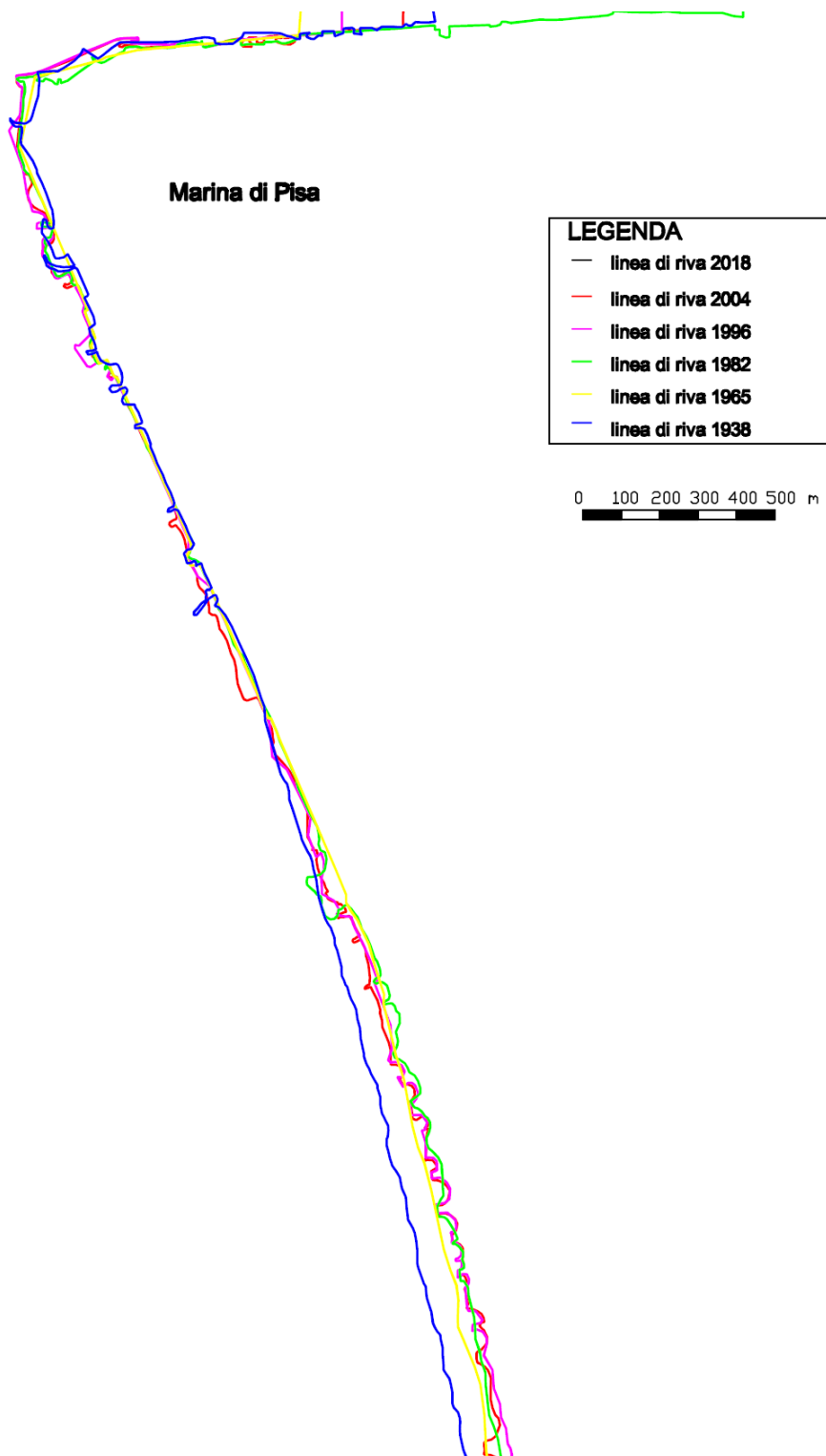


Figura 3.18 - Linee di riva per il litorale di Marina di Pisa - anno 2018, 2004, 1996, 1982, 1965, 1938

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

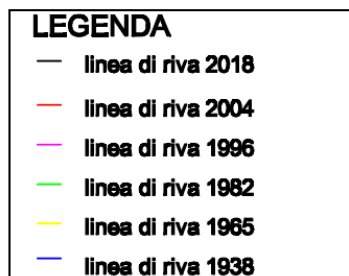
Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx



0 100 200 300 400 500 m

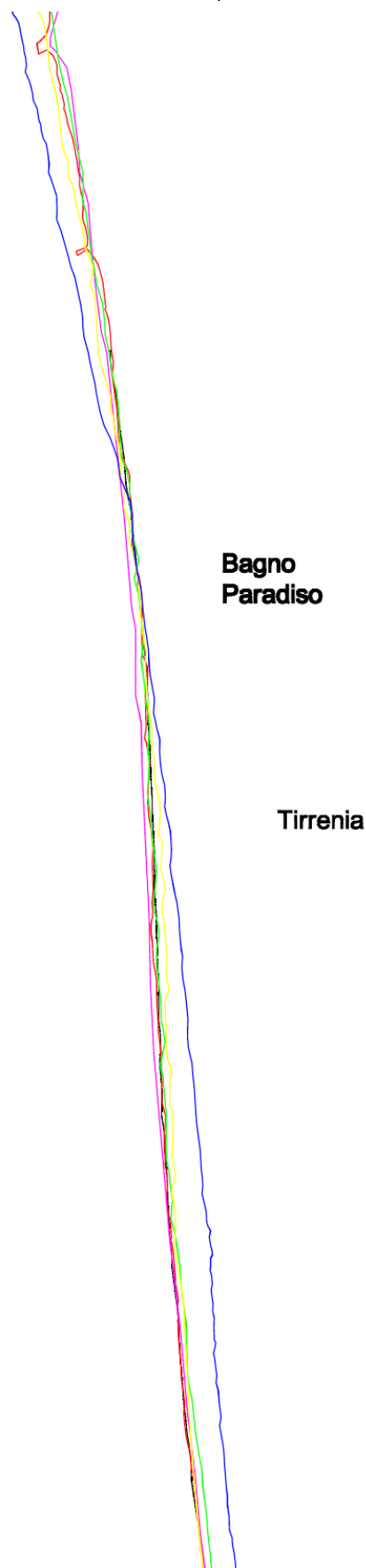


Figura 3.19 - Linee di riva per il litorale di Tirrenia - anno 2018, 2004, 1996, 1982, 1965, 1938

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

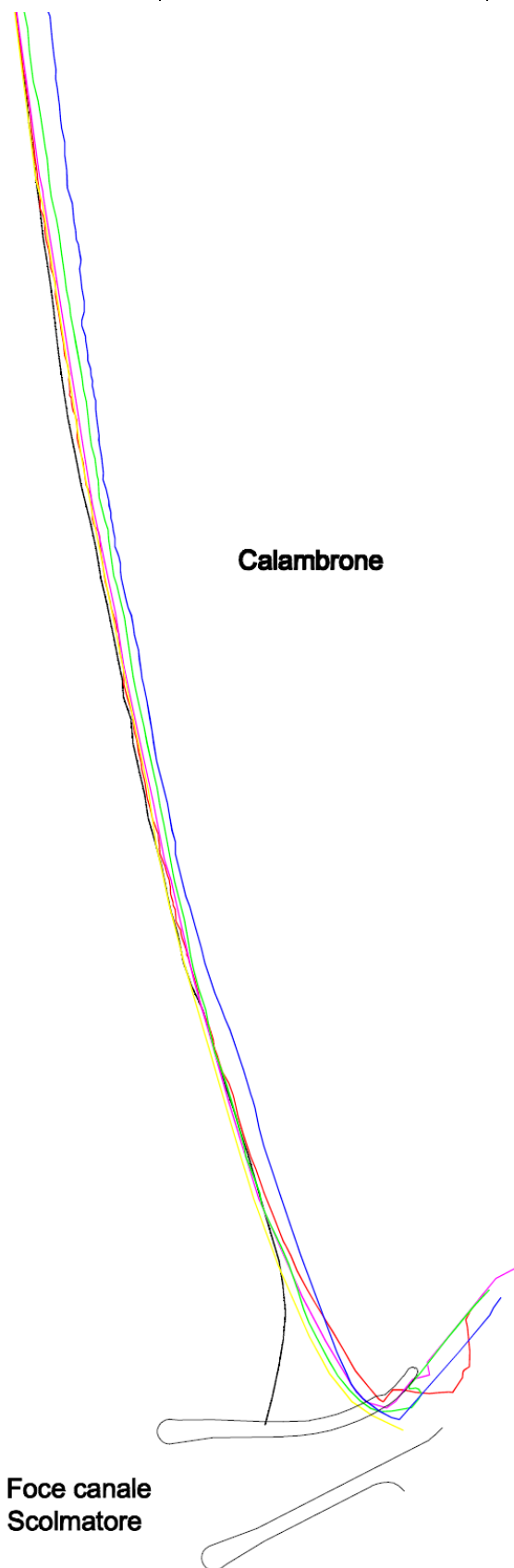
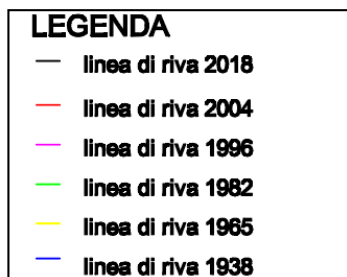


Figura 3.20 - linee di riva per il litorale di Calambrone - anno 2018, 2004, 1996, 1982,1965,1938

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-002_0.docx

### 3.1.2 Evoluzione della foce dell'Arno e dei fondali antistanti

Tendenzialmente il processo erosivo presente sulla spiaggia emersa, come visto nei paragrafi precedenti, ha un riscontro diretto sulla parte sommersa. L'arretramento della linea di riva è stato generalmente accompagnato da un analogo arretramento del profilo batimetrico, almeno nella fascia di fondale dinamicamente più attiva (ovvero entro l'isobata 5 metri), e della barra presente fra i 3 e i 5 metri di profondità (Pranzini e Scagliocco. Adb Arno, 1994).

Esaminando i rilievi batimetrici effettuati in varie epoche è stato possibile ricostruire le variazioni nel tempo dei volumi di sedimenti della spiaggia sommersa. L'autorità di bacino del fiume Arno, attraverso uno studio di V. Milano (1986), ha calcolato le variazioni areali delle varie sezioni del litorale in diversi intervalli temporali dal 1846 al 1983. Le aree di interesse vanno dalla profondità di chiusura della spiaggia sommersa fino al punto di battigia più arretrato tra quelli considerati alla quota del livello medio mare.

Nel periodo 1846÷1881 si osserva l'inizio di una forte erosione sia a Sud che a Nord della foce dell'Arno. In sinistra idraulica, immediatamente a Sud della foce, in corrispondenza di Marina di Pisa, risulta una perdita di sedimento, in appena 3 km, di 159.000 m<sup>3</sup>/annui dovuti al trasporto longitudinale. L'erosione si spinge da Marina di Pisa, sorta nel periodo di massima espansione del delta, fino a Sud di Tirrenia con perdite trasversali di 240.000 m<sup>3</sup> di sedimento annui; mentre risulta in avanzamento il tratto da Tirrenia fino al porto di Livorno con un aumento di volume di sabbia, al netto della perdita trasversale di 255.000 m<sup>3</sup> annui. Nello stesso periodo, in destra idraulica del fiume Arno, si osserva invece una erosione molto limitata che si estende solo fino a poco più di 2 Km a Nord.

Nel periodo 1881÷1931 prosegue l'erosione nel tratto di Marina di Pisa con una perdita di 191.000 m<sup>3</sup>/annui in soli 3 Km e si intensifica la demolizione della foce dell'Arno. Il tratto in avanzamento a partire dal porto di Livorno si estende più a Nord raggiungendo la parte meridionale del litorale di Marina di Pisa, con un incremento di materiale minore rispetto al periodo precedente (149.000 m<sup>3</sup>/annui). In destra idraulica del fiume l'erosione risulta di entità maggiore e si protrae verso Nord fino all'altezza del Gombo, in questo tratto la perdita di materiale è di 306.000 m<sup>3</sup>/annui.

Infine nel periodo 1931÷1983 si osserva che l'entità del trasporto, diretto globalmente verso Sud, in sinistra idrografica dell'Arno risulta molto limitato; il trasporto aumenta procedendo verso Sud e il valore massimo di ha nei pressi di Tirrenia; più contenuto risulta anche l'avanzamento del litorale tra Livorno e Tirrenia (36.700 m<sup>3</sup>/annui). La demolizione del delta dell'Arno continua a progredire, anche se con intensità minore rispetto agli altri periodi, mentre invece si accentua l'erosione in destra idraulica dell'Arno, che raggiunge la foce del Fiume Morto Nuovo (con una perdita di 363.000 m<sup>3</sup>/annui).

In Figura 3.21 si riporta una sintesi dei risultati ottenuti dall'analisi del trasporto solido longitudinale tra la profondità di chiusura e la battigia.

L'autorità di bacino dell'Arno ha analizzato l'evoluzione morfologica dei fondali del paraggio mettendo a confronto i rilievi del 1993 con i dati del 1983; i dati sono relativi a profili estrapolati ogni 500 m di litorale. Di seguito si riportano la planimetria dell'area oggetto di analisi (Figura 3.22 e Figura 3.23) e i profili verticali estratti per il confronto dell'evoluzione avvenuta dal 1983 al 1993 (Figura 3.24 e Figura 3.25). Dall'analisi risulta che davanti l'abitato di Marina di Pisa prosegue il processo di erosione e scalzamento alla base delle scogliere mentre il fondale più al largo rimane pressoché stabile (fatta eccezione per alcuni scostamenti puntuali compresi fra i 7 e i 40 cm). Sui tratti di spiaggia protetti da pennelli, tra Tirrenia e Marina di Pisa, l'erosione procede comportando un abbassamento del fondale di circa 28 cm; particolarmente intensa risulta l'erosione del fondale del tratto di Tirrenia dove si raggiunge un abbassamento di 37 cm.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

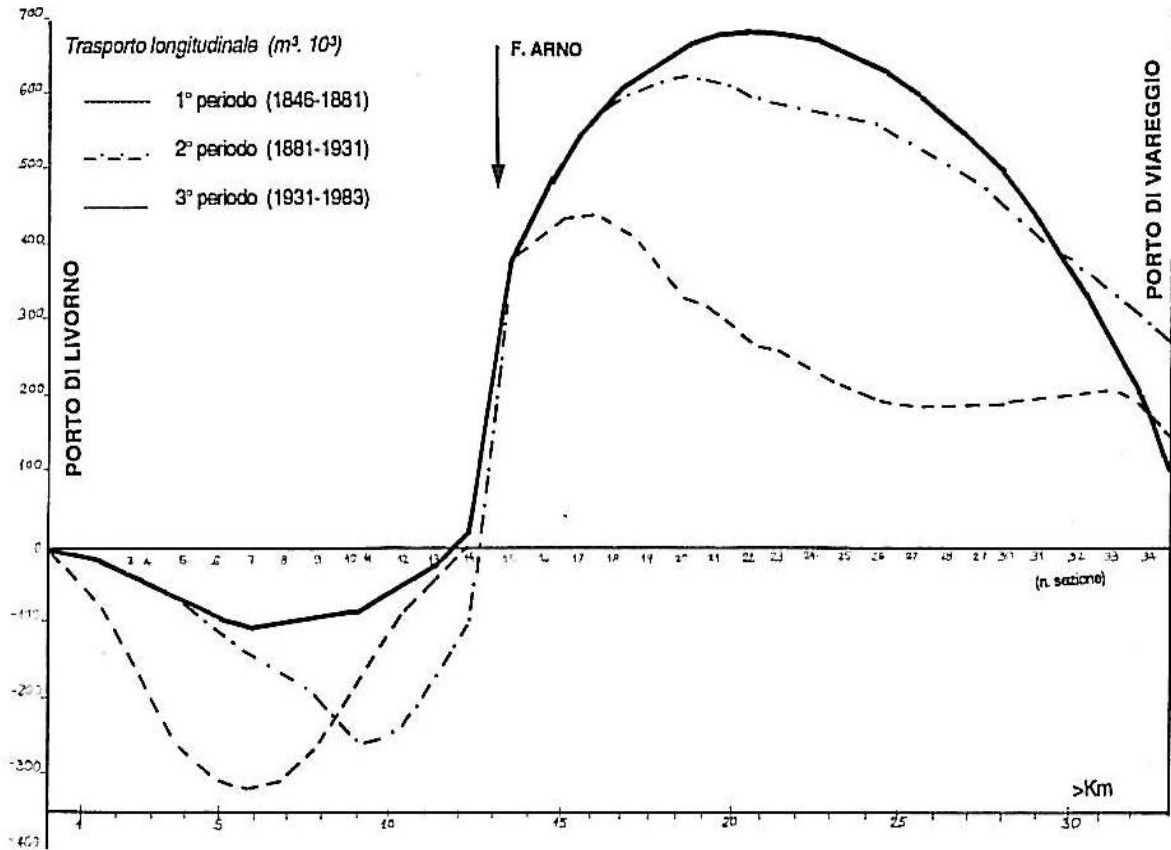


Figura 3.21 - Andamento del trasporto solido longitudinale nel tratto di litorale compreso tra i porti di Livorno e Viareggio dal 1846 al 1983 dalla profondità di chiusura alla battigia

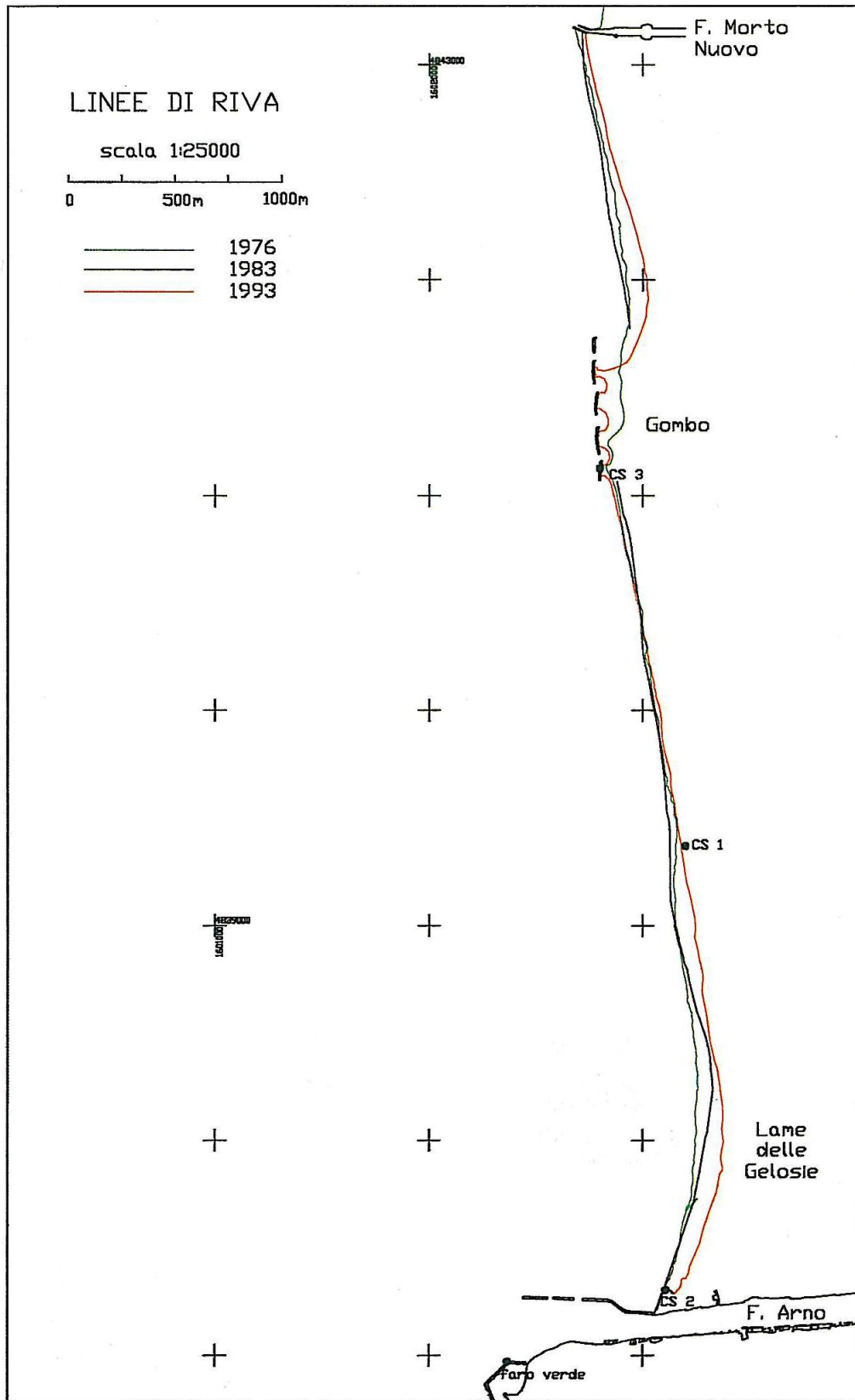


Figura 3.22 - Tratto a Nord della foce dell'Arno. Linee di riva 1976 (CTR), 1983 (Idrocart, Genova), 1993 (Università di Firenze)



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

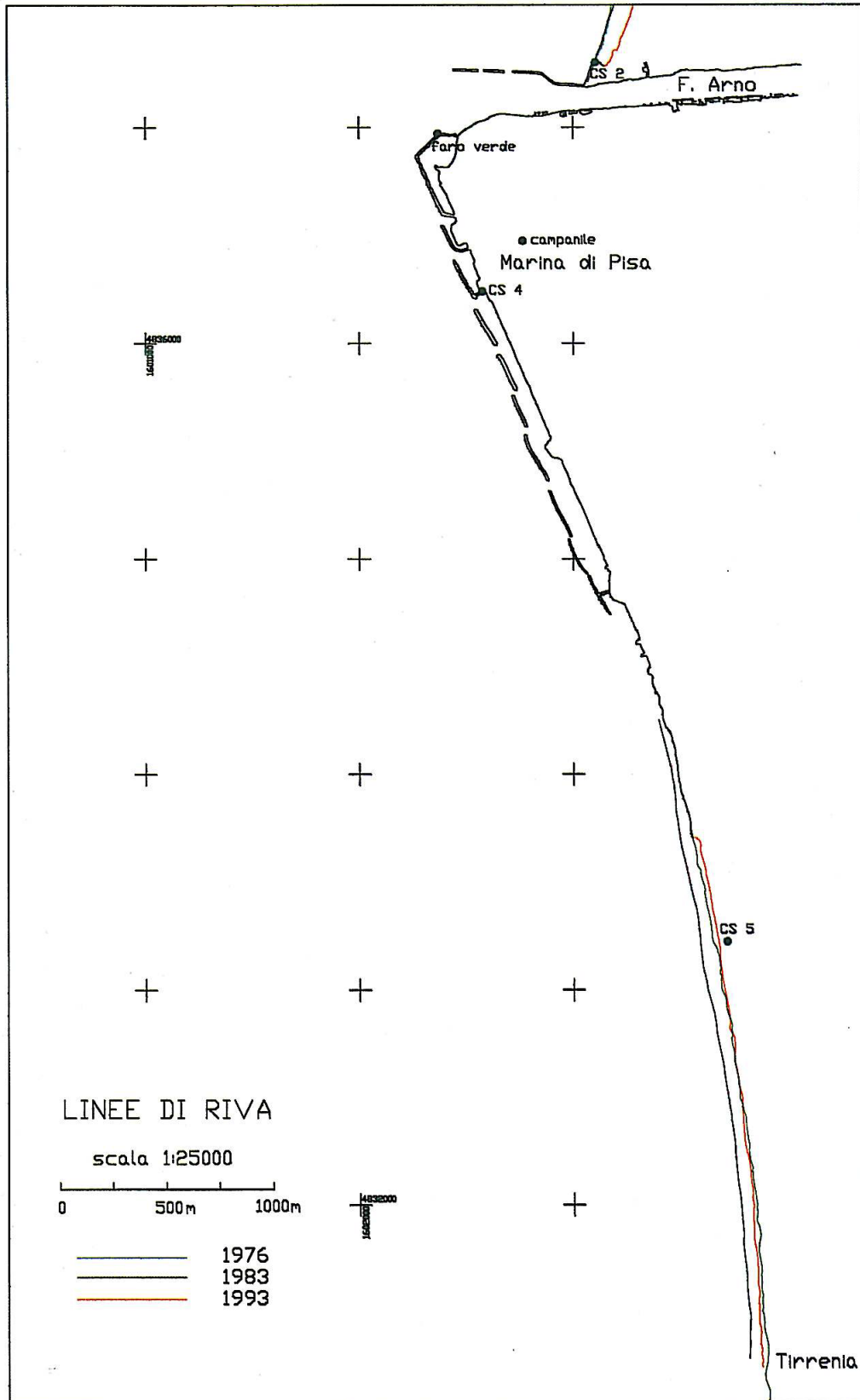


Figura 3.23 - Tratto a Sud della foce dell'Arno. Linee riva 1976 (CTR), 1983 (Idrocart, Genova), 1993 (Università di Firenze)

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

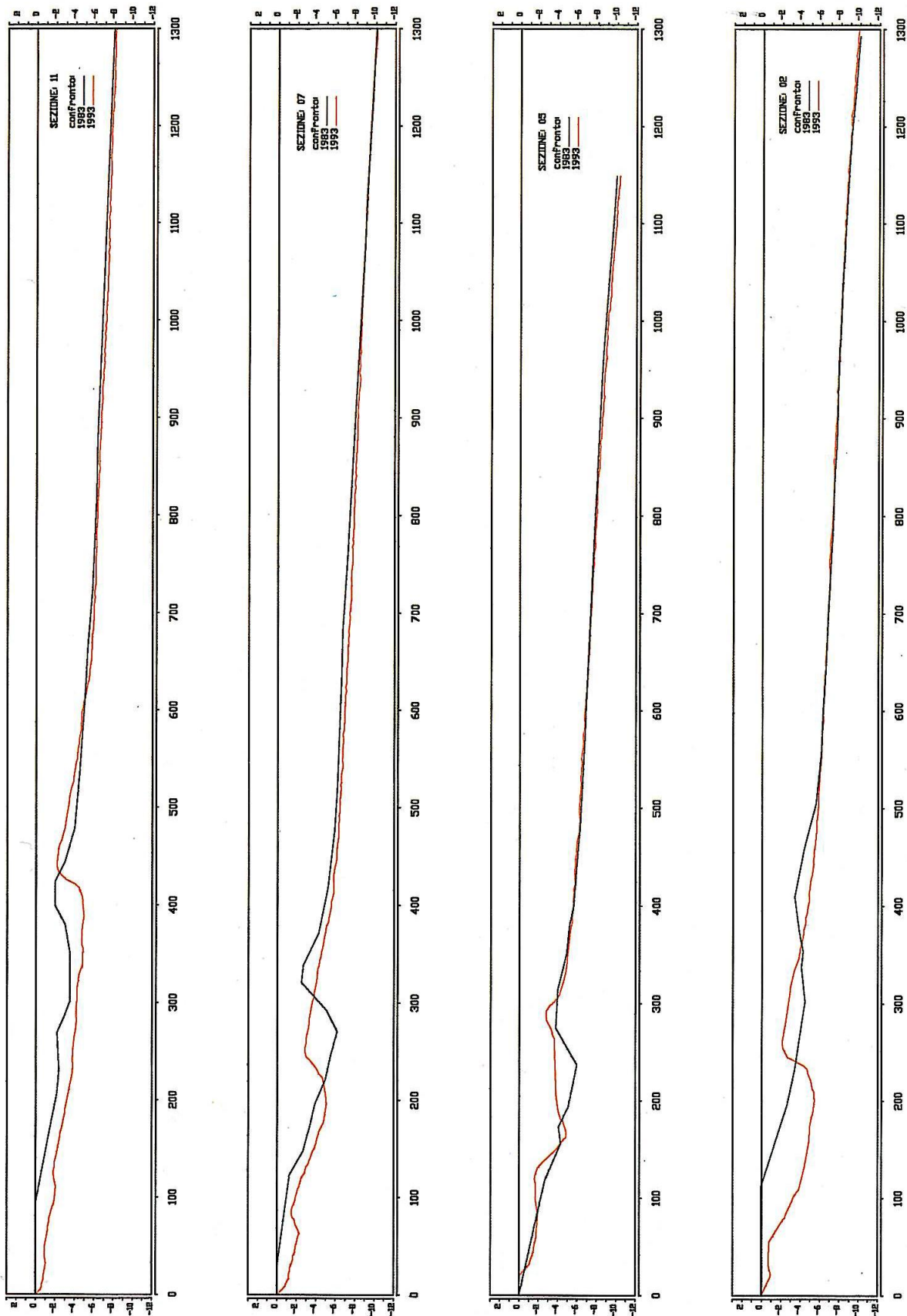


Figura 3.24 - Profili barimetrici del 1983 (Idrocart, Genova) e del 1993 (Università di Firenze) per il tratto di litorale tra Tirrenia e la foce del Fiume Morto Nuovo

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

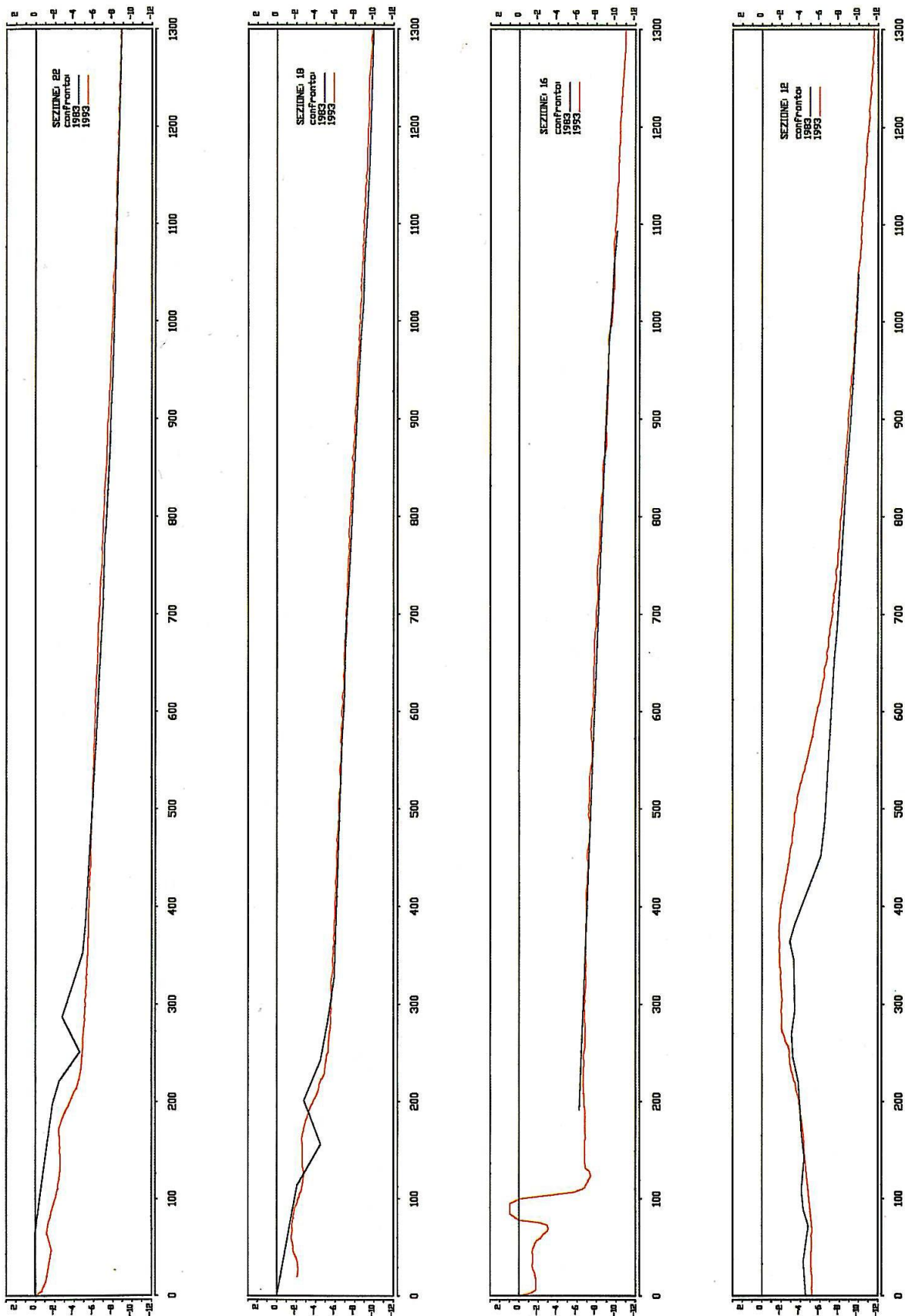


Figura 3.25 - Profili batimetrici del 1983 (Idrocart, Genova) e del 1993 (Università di Firenze) per il tratto di litorale tra Tirrenia e la foce del Fiume Morto Nuovo

<b>Progetto:</b> Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	<b>Livello progettazione:</b> Progetto di fattibilità tecnico economica	<b>Elaborato:</b> IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-002_0.docx
---	--	--

### 3.1.3 Evoluzione della foce dello scolmatore e dei fondali antistanti

Il tratto di litorale sul quale insiste la foce dello Scolmatore presenta caratteristiche tendenzialmente diverse rispetto all'arco costiero di appartenenza, alimentato principalmente dagli apporti sedimentari del Fiume Arno. Un'influenza non trascurabile sull'evoluzione di questo tratto di litorale è da attribuirsi anche alla presenza delle Secche della Meloria che, oltre ad attenuare il moto ondoso, sembra contribuiscano, anche se in maniera modesta, all'input di sedimenti nel sistema (Gandolfi e Paganelli, 1975).

Tale area (litorale prossimo alla foce dello Scolmatore) è caratterizzato da un drift con direzione Sud-Nord, diretto in senso opposto rispetto al tratto di litorale più settentrionale; la zona di convergenza del verso del trasporto si trova tra la spiaggia del Calambrone e il litorale di Tirrenia.

Lo studio di Pranzini (2002) si basa su un rilievo batimetrico del litorale compreso fra Livorno e Tirrenia con sezioni distanziate ogni 50 m; il rilievo è stato messo a confronto con altri rilievi precedenti effettuati nel 1997. Dal confronto si evince che in quasi tutto il tratto considerato prevalgono condizioni di modesto approfondimento dei fondali, quasi sempre contenuti entro 0,5 m, con valori più consistenti, (comunque non superiori al metro), nel settore meridionale (Figura 3.26).

Nello studio morfologico del litorale di Calambrone (Casarosa, 2013), in relazione alla costruzione della nuova cassa di contenimento della Darsena Toscana, sono stati messi a confronto i rilievi batimetrici effettuati ante-operam (2012) e dopo la costruzione della darsena (2013). Dal punto di vista qualitativo il confronto tra le curve isobatimetriche mostra una certa omogeneità tra i due rilievi, con una diminuzione delle quote dei fondali davanti alla foce dello Scolmatore, tra l'isobata -5 m e la -7 m s.m.m. e anche tra la -7 m e la -10 m s.m.m.; nella fascia più sottocosta (tra la -1 m e la -2.5 m s.m.m.) si osserva tendenza opposta (Figura 3.27).

In seguito alla realizzazione della foce armata dello Scolmatore, che ha cambiato le dinamiche litoranee del tratto in oggetto, la spiaggia immediatamente a Nord della foce è stata interessata da un ripascimento consistente a ridosso del molo Nord della foce e meno intenso procedendo verso Nord. La Figura 3.28 presa dallo studio idrodinamico e morfologico marino del progetto definitivo dell'adeguamento idraulico dello scolmatore, mostra l'evoluzione dei fondali, in fase di progetto, con riferimento ad una mareggiata significativa per il paraggio.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

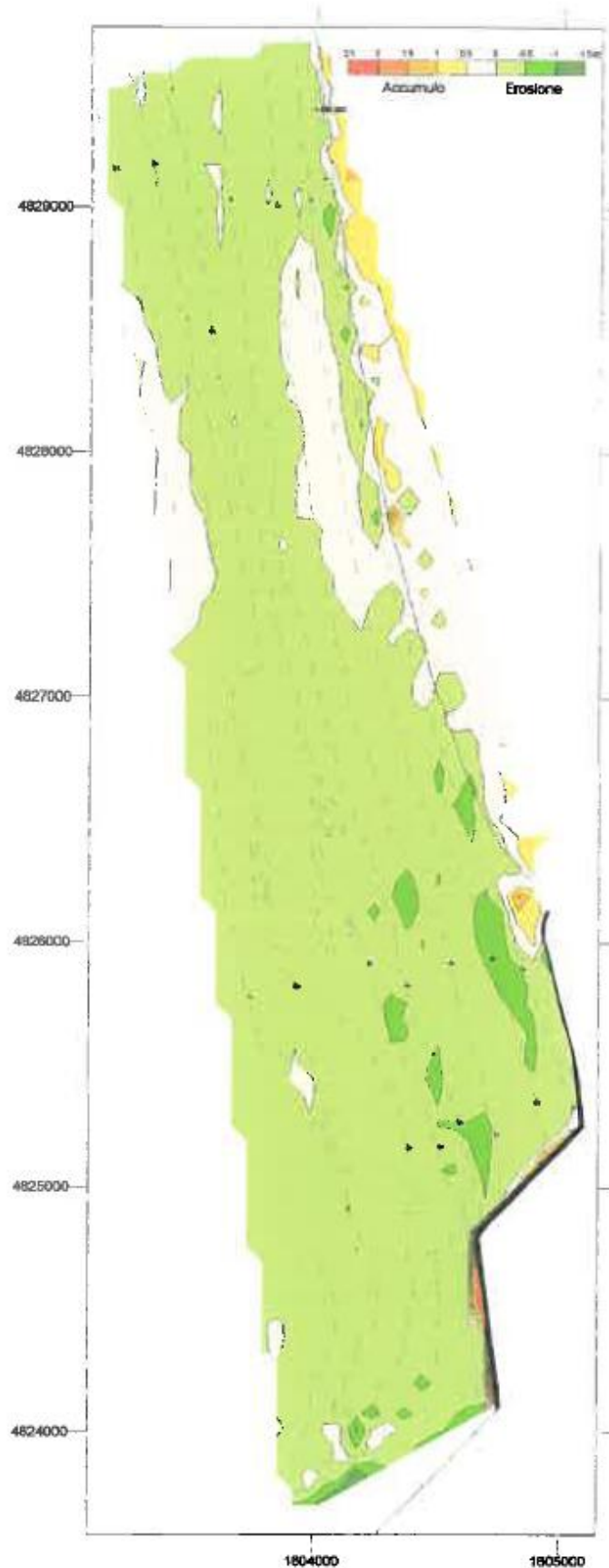


Figura 3.26 - Variazione batimetrica avvenuta fra il 1997 e il 2002 nei fondali antistanti il Calambrone



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

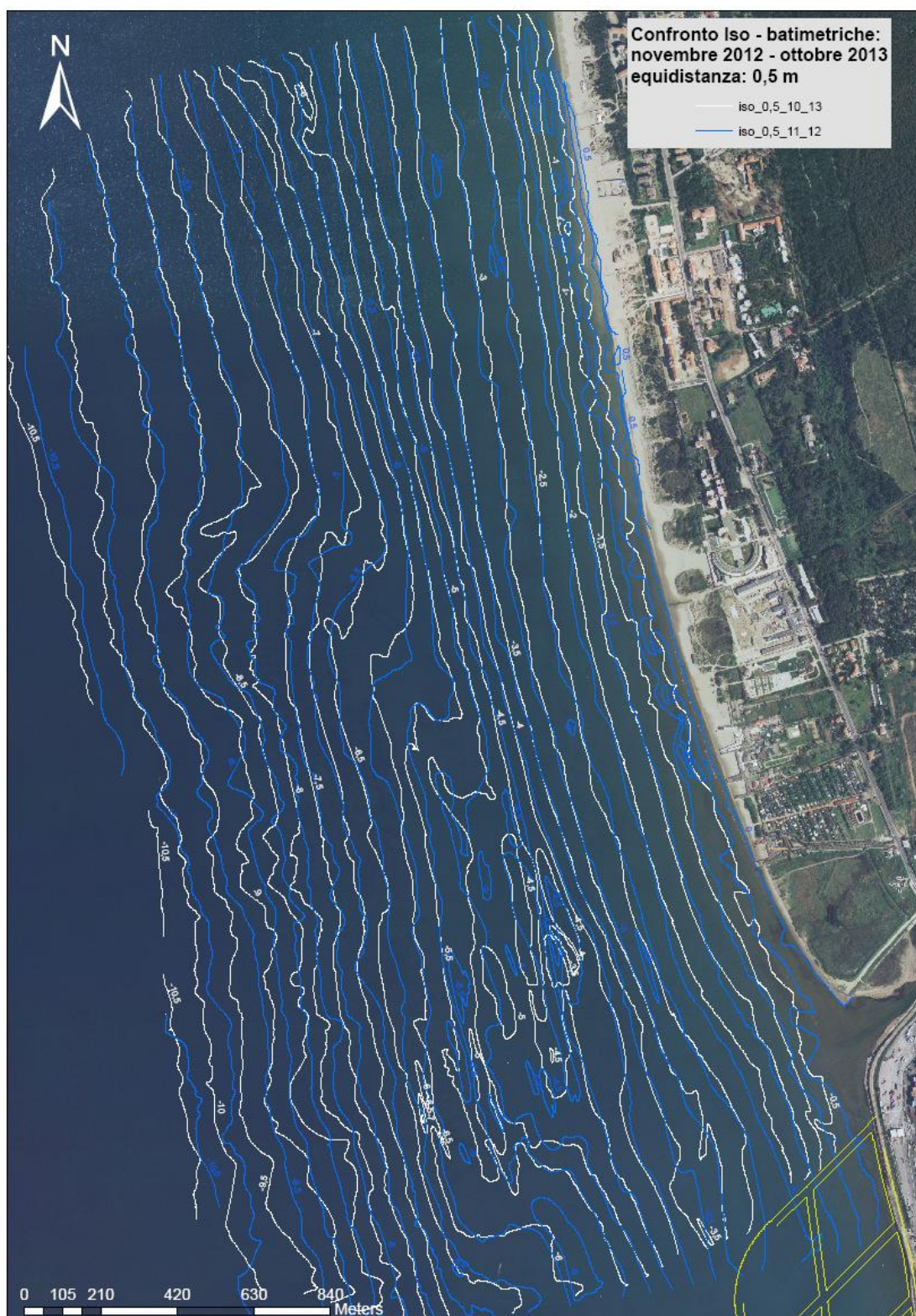


Figura 3.27 - Confronto tra curve isobatimetriche - rilievo novembre 2012 e ottobre 2013



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

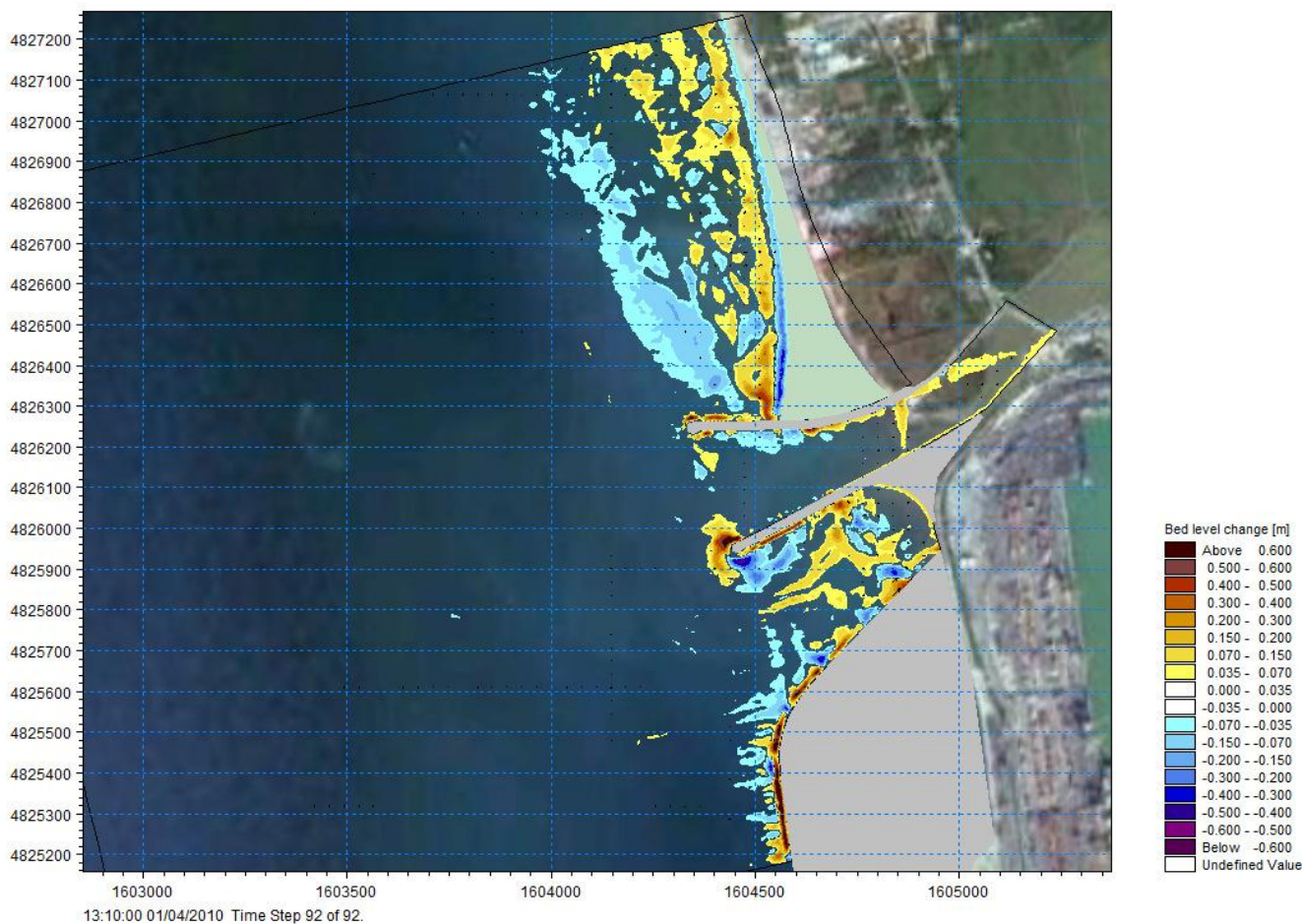


Figura 3.28 - Evoluzione fondale al termine della mareggiata SO e Hmax 4.9 in seguito alla costruzione della foce armata

### 3.1.4 Interpretazione della dinamica litoranea

Il minor apporto di sedimenti da parte del fiume Arno ha innescato un processo erosivo sul litorale pisano e lo smantellamento del delta dell'Arno a seguito della redistribuzione dei sedimenti lungo il litorale da parte del moto ondoso e delle correnti marine.

La zona più colpita dal processo erosivo è l'apice del delta che doveva sostenere la maggiore energia del moto ondoso. Al contrario, procedendo verso le ali del delta, dove l'energia del moto ondoso è minore, si è visto un certo grado di accrescimento grazie al trasporto longitudinale dei materiali provenienti dallo smantellamento delle zone apicali (Pranzini, 1989).

La progressiva rettificazione delle isobate che andava assumendo il delta, ha cercato di determinare un differente pattern di diffrazione delle onde, con una graduale riduzione dell'energia in arrivo sull'apice del delta ed un aumento di quella che colpiva le spiagge laterali. Questo processo, infatti, è responsabile del progressivo spostamento verso i lati del punto di separazione fra le spiagge in erosione e quelle in avanzamento.

Il fenomeno dello smantellamento del delta dell'Arno e dell'erosione lungo costa dei tratti limitrofi quest'ultimo ha avuto luogo in modo differito nel tempo e nello spazio, caratterizzato dalla variazione annuale di apporto di sedimenti del fiume e dalla costruzione di opere di difesa.

La divergenza che la foce dell'Arno presenta in termini di trasporto longitudinale, permette di definire, in prima approssimazione, due andamenti che caratterizzano l'evoluzione della foce e dei fondali antistanti. Il trasporto litoraneo è diretto da Nord verso Sud per il lobo meridionale, mentre dalla foce

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-002_0.docx

dell'Arno fino al porto di Viareggio è diretto nel senso opposto, Sud-Nord come mostrato in Figura 3.1. Focus particolare è richiesto per la zona della foce dello scolmatore dove il quadro è più complesso e presenza un drift litoraneo inverso ovvero Sud-Nord a causa della presenza delle secche della Meloria e del porto di Livorno.

L'intero litorale che va dal porto di Livorno alla foce dell'Arno è notevolmente influenzato dalla presenza delle secche della Meloria a largo della foce dello scolmatore, che originano importanti fenomeni di rifrazione e attenuazione del moto ondoso e nel tratto più a sud del litorale, ne favoriscono l'accrescimento dello stesso con sedimenti più fini.

A Sud della foce dell'Arno, dove gli interventi di difesa hanno avuto luogo già dagli inizi del '900, il tratto di costa dinanzi Marina di Pisa è ormai considerato fisso, ma la presenza delle opere di difesa ha dato modo di approfondire l'erosione del fondale, soprattutto a ridosso delle scogliere a mare.

Il tratto di costa a Nord di Tirrenia, in seguito ad una progressiva diminuzione di materiale mobilitato dal trasporto solido longitudinale (come riportato nel paragrafo 3.1.2 della presente relazione), è rientrato nella fascia di erosione che, negli anni, partendo dalla foce del fiume Arno si è progressivamente allargata verso le ali. Il tratto a Nord dell'abitato attualmente è protetto da scogliere radenti e parallele mentre a Sud dell'abitato il litorale risulta stabile.

Il litorale che si estende da Tirrenia allo Scolmatore d'Arno in passato, usufruendo di un moto ondoso attenuato dalla presenza delle secche della Meloria e dalla riflessione del moto ondoso indotto dalle opere del porto di Livorno, è sempre stato in accrescimento o stabile negli anni. Le recenti costruzioni, quali la vasca di colmata e la foce armata dello scolmatore, hanno modificato la dinamica litoranea spostando tendenzialmente verso nord il punto di convergenza del flusso sedimentario che caratterizzava l'accrescimento del Calambrone.

### 3.1.5 Situazioni di crisi ed interventi di protezione

Come anticipato nei paragrafi precedenti, questo tratto di costa è stato interessato, a partire dalle prime epoche storiche documentabili (VIII-VII secolo a. C.), da un forte avanzamento della linea di riva, proseguita incessantemente fino alla metà dell'Ottocento, quando iniziò a manifestarsi la tendenza all'arretramento, tuttora attiva. Dalle mappe del Catasto del Granducato di Toscana (1835) e dalle varie carte storiche si evince come la linea di riva risultasse molto più avanzata rispetto a quella attuale, in particolare in corrispondenza del delta dell'Arno, ove i lobi della foce si protendevano in mare fra 500 metri e 1 km in più di quanto accade oggi.

Dalla metà del 1800 la situazione si invertì radicalmente e già nel primo decennio del Novecento il delta dell'Arno appare del tutto smantellato: l'erosione colpì innanzitutto la costa a Sud della foce, ove già negli ultimi decenni del XIX secolo il mare arrivò a minacciare l'appena nato abitato di Marina di Pisa, portando alla costruzione delle prime scogliere a difesa della spiaggia; a Nord del delta l'erosione iniziò circa 30 anni dopo.

La tendenza all'erosione proseguì per tutto il XX secolo, col risultato che nel 1983 il lobo destro dell'Arno risultava arretrato di ben 1.200 metri rispetto al 1878, con uno scarto di circa 700 metri rispetto al lobo sinistro protetto dalle opere artificiali. Le cause principali di tale fenomeno, che peraltro continua tutt'ora, sono da ricondursi principalmente al netto calo del trasporto solido dall'Arno. Tale problematica è da attribuire a vari fenomeni che vanno dal mutamento dell'uso del suolo (nel senso di un'agricoltura più parcellizzata che causa minore erosione dei terreni) alle varie opere idrauliche costruite lungo il corso del fiume fino all'escavazione di materiali inerti dall'alveo e alla deviazione di molti sedimenti fluviali nelle casse di colmata costruite per bonificare le aree palustri.

Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-002_0.docx

A Sud dell'Arno nel trentennio 1878÷1908 l'arretramento è stimabile, nel punto di massima intensità, nell'ordine dei 300 metri lineari: anche più a Sud nello stesso periodo l'erosione porta via circa un centinaio di metri lineari di arenile, anche se la costruzione delle scogliere a difesa dell'abitato di Marina di Pisa limita gli arretramenti. Fra Marina di Pisa e Calambrone la costa mostra invece un andamento altalenante, anche se sembrano predominare i fenomeni di accumulo, che hanno portato a un leggero accrescimento dell'arenile nel recente passato.

L'abitato di Marina di Pisa è difeso da scogliere a partire dal 1898; l'arretramento come prevedibile si è aggravato man mano che si procedeva alla realizzazione delle scogliere verso Sud.

La difesa dell'abitato di Marina di Pisa è stata realizzata con opere di varia tipologia: prevalentemente scogliere (barriere distaccate e radenti), di notevoli dimensioni, per un tratto della lunghezza di 2.5 km; in totale si rilevano 10 barriere distaccate parallele alla riva. In origine tutte le barriere distaccate risultavano emerse ma nel recente passato (tra il 2005 e il 2015) quattro su dieci sono state ribassate fino a -0,50 m ed allargate, e a riva sono state ricostruite delle spiagge in ghiaia. La realizzazione di queste opere ha permesso di stabilizzare la linea di riva ma non di impedire l'erosione dei fondali antistanti. Al piede esterno delle scogliere parallele si raggiungono a tutt'oggi anche i 7 m di fondale.

Nel tratto successivo, più a Sud, sono state realizzate difese di vario tipo (scogliere parallele, piccoli pennelli, difese radenti) di dimensioni più modeste, anche ad opera dei proprietari degli stabilimenti balneari. La spiaggia è in gran parte costituita da piccolissime pocket beach artificiali formatesi dietro le difese parallele, di dimensioni ridotte (in lunghezza) e vicine a riva, che hanno formato dei tomboli. In questo tratto il mantenimento della spiaggia è stato, nel passato, a carico degli stabilimenti balneari che hanno sostenuto in proprio il ripascimento dell'arenile ad inizio stagione.

Il tratto successivo, fino a 800 m a Nord dal centro di Tirrenia, non ha alcuna opera a mare che possa contenere l'erosione ed è quello che ad oggi risulta più vulnerabile. Nel recente passato si è ipotizzato di proseguire le esistenti barriere sommerse ed eseguire consistenti ripascimenti con il materiale proveniente dal dragaggio delle foci della Foce dell'Arno e del canale Scolmatore.

### 3.2 Strategia di difesa attuale

La politica di difesa dei litorali toscani negli ultimi anni ha subito un lento ma efficace cambiamento grazie all'aggiornamento del quadro normativo: si è passati dal sistema di difesa rigido, imposto dall'urgenza di difendere i centri abitati e le infrastrutture costiere, a metodologie di riequilibrio dei litorali basate sulla prevenzione del fenomeno erosivo e sulla progettazione di interventi che prevedano anche azioni di riequilibrio della spiaggia (ripascimento artificiale).

La pianificazione dei nuovi interventi deriva infatti da analisi approfondite che riguardano la morfologia dei fondali e della costa, e da analisi delle condizioni meteomarine e dei processi costieri che stanno alla base delle problematiche individuate. Nel dettaglio la progettazione dei nuovi interventi dovrà essere preceduta dall'esecuzione di una campagna di rilievi topo-batimetrici della spiaggia emersa e sommersa, e da studi meteomarini e studi della tendenza evolutiva e del trasporto solido.

Per il tratto di litorale compreso tra la foce dell'Arno e la foce dello Scolmatore, gli interventi che saranno oggetto di specifica progettazione, al termine degli studi e analisi propedeutiche, riguardano la difesa dell'abitato di Marina di Pisa attraverso la modifica delle opere esistenti e il ripascimento dell'arenile. Per questi interventi sono stati stanziati circa 13 M € da distribuire tra il tratto settentrionale e meridionale del litorale.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

Nel dettaglio nel tratto più meridionale del litorale di Marina di Pisa si prevede, a conclusione dei lotti di Marina di Pisa, la sostituzione (fino allo stabilimento Lido) dei sistemi difensivi emersi di piccole dimensioni posti a protezione dei bagni di Marina di Pisa con una o due celle soffolte che vadano a connettersi a Sud con le più recenti opere di difesa ed a Nord con la barriera emersa n. 10, prevedendo dove necessario il ripascimento dell'arenile (Figura 3.29).

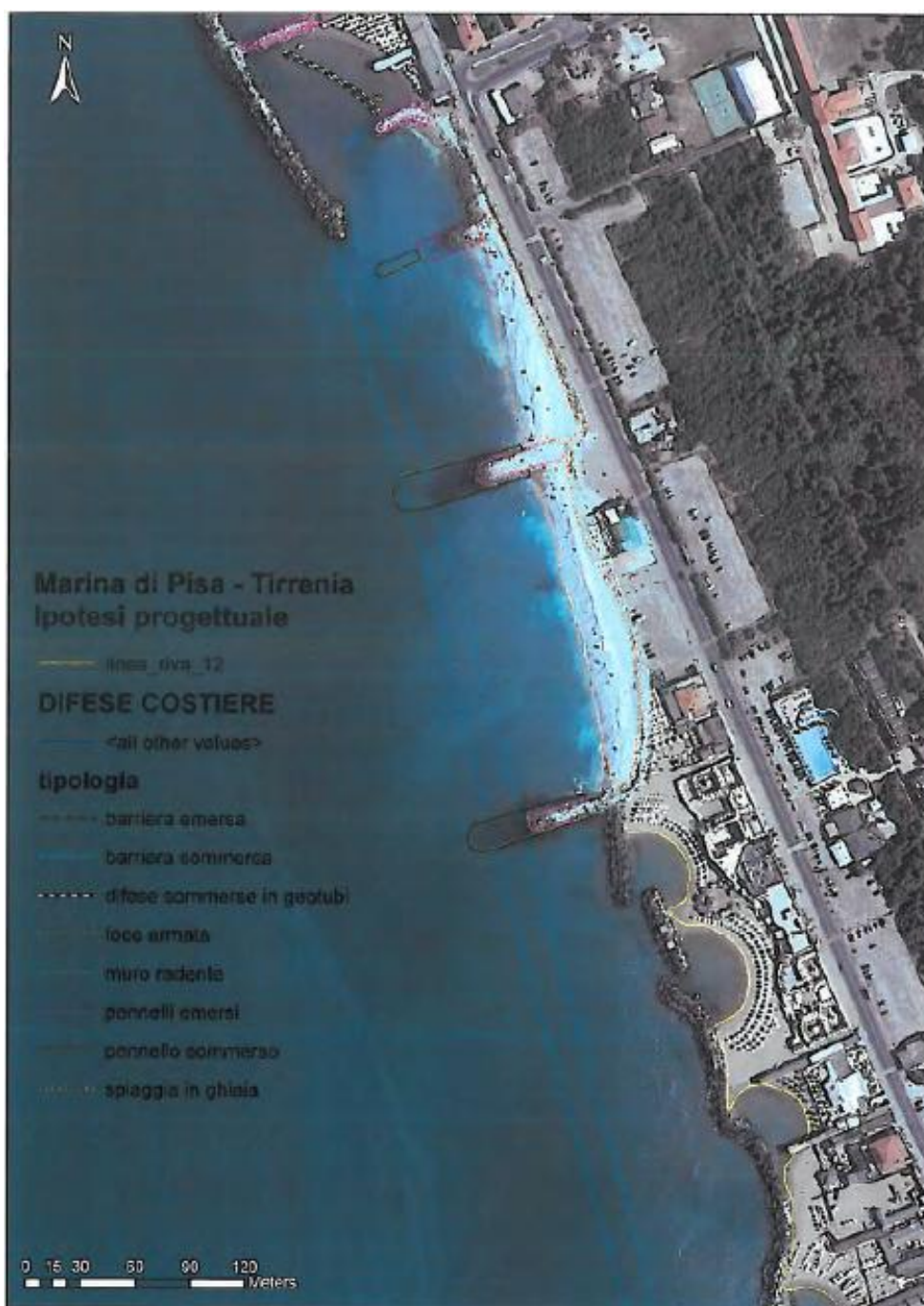


Figura 3.29 - Tratto meridionale del litorale, interessato dall'ipotesi di prolungamento delle diga soffolta



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

### 3.3 Evoluzione recente del litorale

L'evoluzione recente del litorale può essere indagata sulla base del rilievo della linea di costa eseguito dagli scriventi in concomitanza del sopralluogo eseguito il 9 e 10 ottobre 2019. In particolare è stato rilevato il limite superiore ordinario della fascia di battigia (indicativamente +0.50 m s.m.m.) che rappresenta un elemento più stabile e meno soggetto a variazioni rispetto al livello medio del mare.

L'andamento della linea rilevata è rappresentato nelle successive figure. In Figura 3.30 e Figura 3.31 è riportato l'andamento della linea rilevata rispettivamente nei tratti di litorale di Calambrone e di Tirrenia. Il tratto di litorale di Marina di Pisa non è stato oggetto di rilievo in quanto la linea di riva risulta sostanzialmente vincolata per effetto della presenza delle numerose opere di difesa.

L'analisi del rilievo ha mostrato una sostanziale tendenza della spiaggia alla stabilità nel tratto di Calambrone e Tirrenia, evidenziando tuttavia in alcuni tratti delle criticità relative alla vicinanza della riva alle strutture balneari presenti sulla spiaggia, in particolare al margine settentrionale della spiaggia di Tirrenia.



Figura 3.30 - Limite superiore della fascia di battigia rilevato nel tratto di litorale di Calambrone



Figura 3.31 - Limite superiore della fascia di battigia rilevato nel tratto di litorale di Tirrenia



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

Nello specifico sono state individuate due aree (aree tratteggiate in verde in Figura 3.30 e Figura 3.31) in cui le strutture risultano molto vicine alla riva; l'area individuata nel tratto del litorale di Calambrone (Figura 3.32) presenta numerose strutture a distanze variabili tra i 15 e i 5 m dalla linea di costa mentre l'area nel tratto del litorale di Tirrenia (Figura 3.33) presenta alcune strutture che si trovano parzialmente oltre la linea di costa.

In definitiva da tale analisi si evince che l'area attualmente più vulnerabile risulta essere quella al margine settentrionale del litorale di Tirrenia, che coincide con l'estremità meridionale del litorale di Marina di Pisa, completamente protetto dalle numerose opere presenti.

Tuttavia si rileva che alcune criticità sono presenti anche lungo il tratto di litorale di Calambrone, che attualmente si presenta relativamente stabile; saranno quindi da valutare con particolare attenzione eventuali variazioni del regime del trasporto solido che possano portare a ulteriori arretramenti della linea di riva, con particolare riferimento al tratto di costa compreso tra lo Scolmatore e il bagno Tirreno 2000.



Figura 3.32 - Limite superiore della fascia di battigia rilevato nella zona più critica del litorale di Calambrone



Figura 3.33 - Limite superiore della fascia di battigia rilevato nella zona più critica del litorale di Tirrenia

## 4 ANALISI DEL TRASPORTO POTENZIALE

Sulla base dei risultati delle propagazioni locali del clima ondoso, descritte in dettaglio nell'elaborato 1233\_PP-D-001\_0 ("Relazione idraulica marittima"), è stato possibile condurre un'analisi preliminare della tendenza evolutiva del litorale a Nord del porto di Livorno, tra la foce dello Scolmatore e la foce dell'Arno. L'analisi è stata eseguita con riferimento ai climi locali definiti in una serie di punti antistanti il litorale (su profondità variabili tra -4.5 e -10.0 m s.m.m. circa) e alla conformazione del paraggio (andamento della linea di costa). Lungo il litorale a Nord del Porto di Livorno, al limite della fascia attiva (ad una distanza di circa 600 m dalla costa, sono stati individuati 6 punti di output del clima locale (la cui ubicazione è riportata in Figura 4.1), aventi le seguenti caratteristiche:

- punto P1: coordinate (1603965 E, 4826730 N), profondità pari a circa -4.5 m;
- punto P2: coordinate (1603516 E, 4828676 N), profondità pari a circa -4.8 m;
- punto P3: coordinate (1603303 E, 4830664 N), profondità pari a circa -5.4m;
- punto P4: coordinate (1603152 E, 4832656 N), profondità pari a circa -6.3 m;
- punto P5: coordinate (1602677 E, 4834590 N), profondità pari a circa -7.2 m;
- punto P6: coordinate (1601849 E, 4836410 N), profondità pari a circa -9.8 m.

Le coordinate dei punti di output e dei punti di origine delle griglie (vertici in basso a sinistra) sono espresse nel sistema di riferimento Gauss Boaga Fuso Ovest.

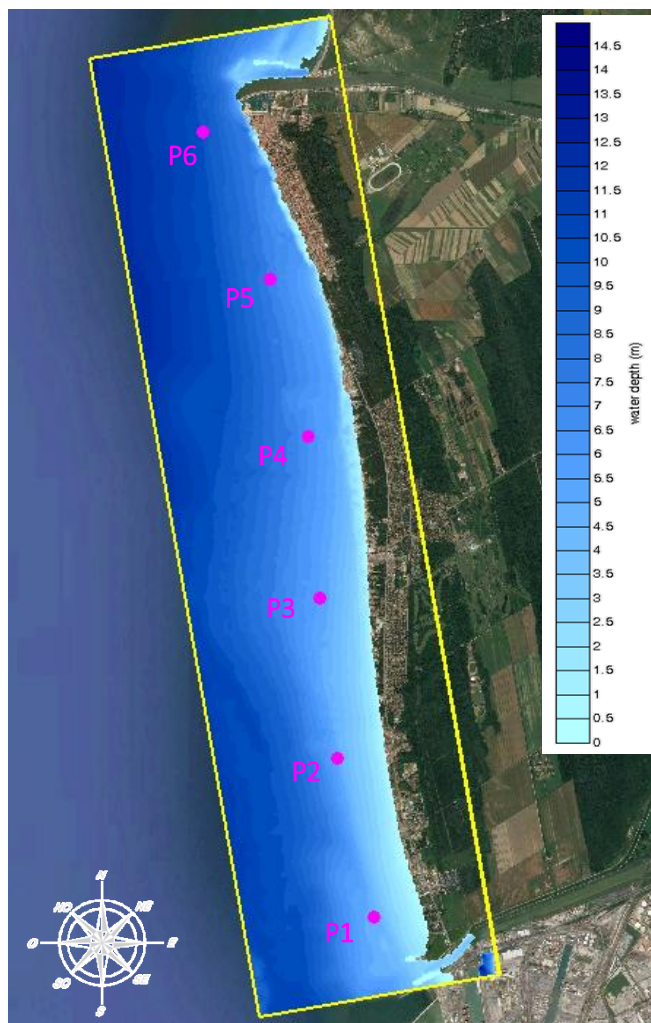


Figura 4.1 - Batimetria di dettaglio con ubicazione dei punti di output del clima locale



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA  
1233\_PP-D-002\_0.docx

L'elaborazione della rosa delle energie nei punti sottocosta ha consentito di stimare, in via preliminare, l'intensità e il verso del trasporto potenziale.

La propagazione locale del clima ondoso (cfr. Elaborato 1233\_PP-D-001\_0) è stata condotta con riferimento allo scenario di stato attuale (layout attuale del porto di Livorno) che con riferimento alla configurazione di progetto del porto prevista nell'ambito del presente progetto (layout prima fase di PRP opportunamente ottimizzato). Nella successiva Figura 4.2 si riportano le rose delle energie per i 6 punti lungo il litorale a Nord dello Scolmatore fino alle foce dell'Arno ricostruite sulla base delle simulazioni condotte con riferimento alla configurazione attuale e di progetto del porto di Livorno. Le rose sono state rappresentate adottando la stessa scala di rappresentazione per tutti i punti.



Figura 4.2 – Rose delle energie per i 6 punti sottocosta con riferimento a: configurazione attuale del porto (a sinistra in verde) e di progetto (a destra in rosso)



Progetto:	Livello progettazione:	Elaborato:
Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale	Progetto di fattibilità tecnico economica	IDRAULICA MARITTIMA 1233_PP-D-002_0.docx

In linea generale si osserva come procedendo da Sud verso Nord (dal punto P1 al punto P6), l'energia aumenta; nelle rose si evidenzia inoltre una rotazione del picco dell'energia di circa 20° (passa da 245° N a 255°÷265°N); l'energia è comunque sempre concentrata nel settore di Ponente. Dal confronto tra i due scenari (configurazione attuale e di progetto), si osserva come la nuova configurazione prevista per il porto di Livorno (prima fase di attuazione della piattaforma Europa) comporti una modifica del clima locale nel primo tratto a Nord del Calambrone (per circa 3 km). Le rose ricostruite nei punti P1 e P2 mostrano l'effetto di schermatura dovuto all'ampliamento della piattaforma portuale, con rotazione del picco della rosa di energia verso Ponente. L'influenza è più evidente nel punto P1 (ubicato immediatamente a Nord del Calambrone); a Nord del punto P2 le differenze sono pressoché trascurabili.

Il confronto tra le due condizioni (attuale e progetto), in termini di flusso di energia e trasporto potenziale, ha consentito inoltre di pervenire ad alcune considerazioni preliminari sull'evoluzione morfologica del litorale a Nord del porto e sull'influenza delle modifiche introdotte con la realizzazione delle opere previste per lo sviluppo della piattaforma portuale.

Più in dettaglio, con riferimento al clima ondoso in corrispondenza dei punti di output locali, sono state calcolate le componenti del flusso di energia. Il flusso di energia, a meno di una costante dimensionale moltiplicativa, può essere espresso come:

$$\Phi \propto H_s^2 \cdot T_p \cdot \sin(2\alpha_0),$$

dove  $H_s$  rappresenta l'altezza significativa di ciascun evento,  $T_p$  il periodo di picco e  $\alpha_0$  la direzione dell'onda rispetto alla normale al litorale (direzione determinata con riferimento all'andamento medio della linea di costa nel tratto antistante il punto di interesse).

Il bilancio globale del flusso di energia, con riferimento alla normale al litorale nel tratto analizzato, è rappresentato graficamente nelle successive figure (da Figura 4.3 a Figura 4.5). Le immagini rappresentano i tre tratti di litorale in cui è stata suddivisa l'arcata litoranea tra Scolmatore e Arno: litorale del Calambrone, litorale di Tirrenia e Marina di Pisa.

Per quanto riguarda il primo tratto a Nord del porto di Livorno (litorale del Calambrone; Figura 4.3), si osserva come il trasporto potenziale, con il porto in configurazione attuale (freccette verdi), sia globalmente diretto verso Nord. Le modifiche proposte al layout delle opere foranee del porto (prima fase di attuazione della Piattaforma Europa) determinano una riduzione del trasporto (freccette rosse), soprattutto nel tratto di litorale immediatamente a Nord della foce dello Scolmatore (punto P1); il verso rimane invariato e diretto verso Nord.

Procedendo verso Nord (litorale di Tirrenia; Figura 4.4), le modifiche introdotte al layout portuale non influiscono sul verso e l'entità del trasporto, per cui il trasporto potenziale con riferimento alle due configurazioni risulta sostanzialmente coincidente. Si osserva un punto di inversione nel verso del trasporto: nel primo tratto del litorale di Tirrenia il trasporto potenziale è diretto ancora verso Nord mentre nella parte più settentrionale risulta meno intenso e diretto verso Sud.

Nell'ultimo tratto di litorale (Marina di Pisa; Figura 4.5), il trasporto potenziale aumenta di intensità e risulta diretto verso Sud. Allo stato attuale questo tratto di litorale si presenta fortemente antropizzato e protetto da una serie di opere rigide (difese radenti, pennelli e scogliere in parte tombolate).

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

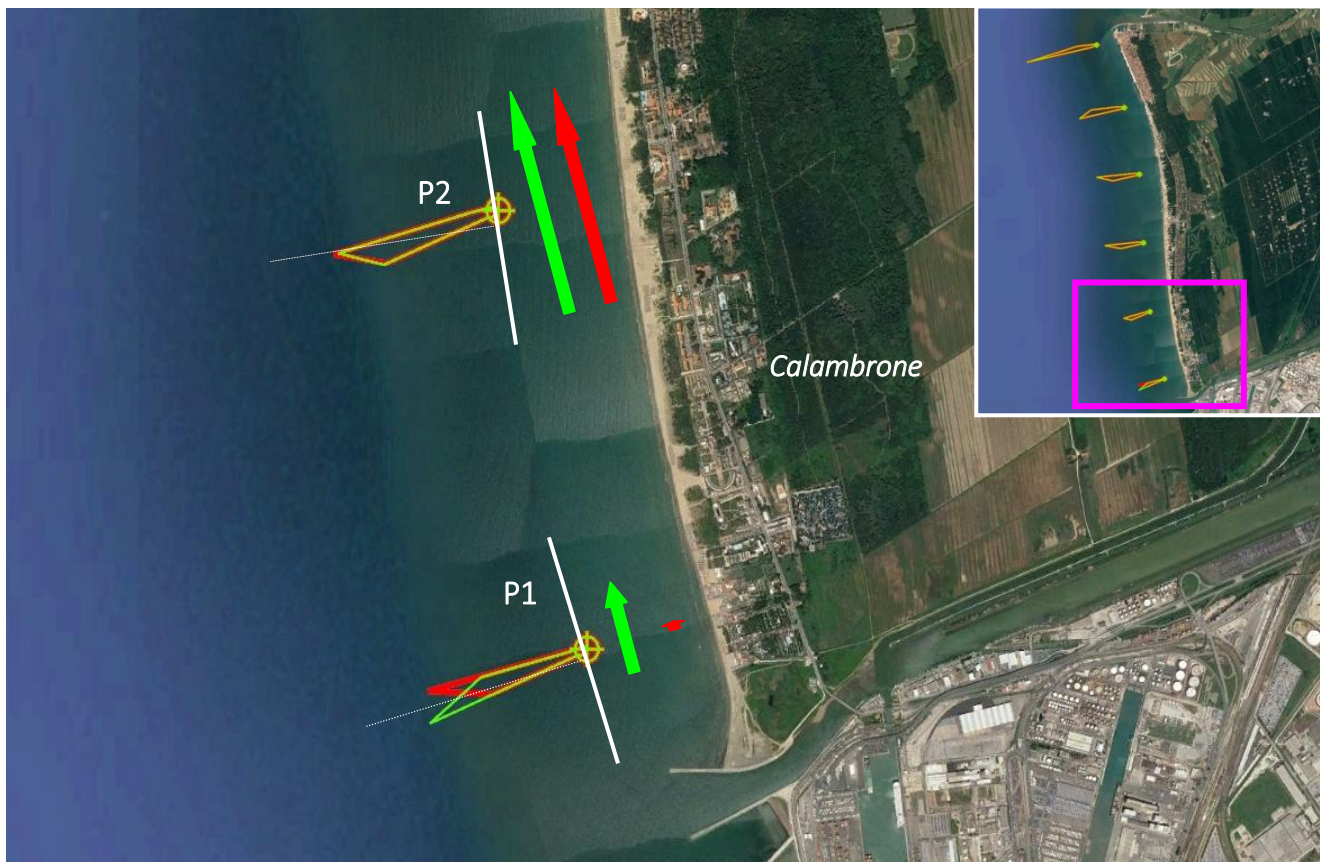


Figura 4.3 –Direzione del trasporto potenziale per il primo tratto a Nord dello Scolmatore (litorale del Calambrone)Confronto flussi in configurazione attuale del porto (verde) e di progetto (rosso)

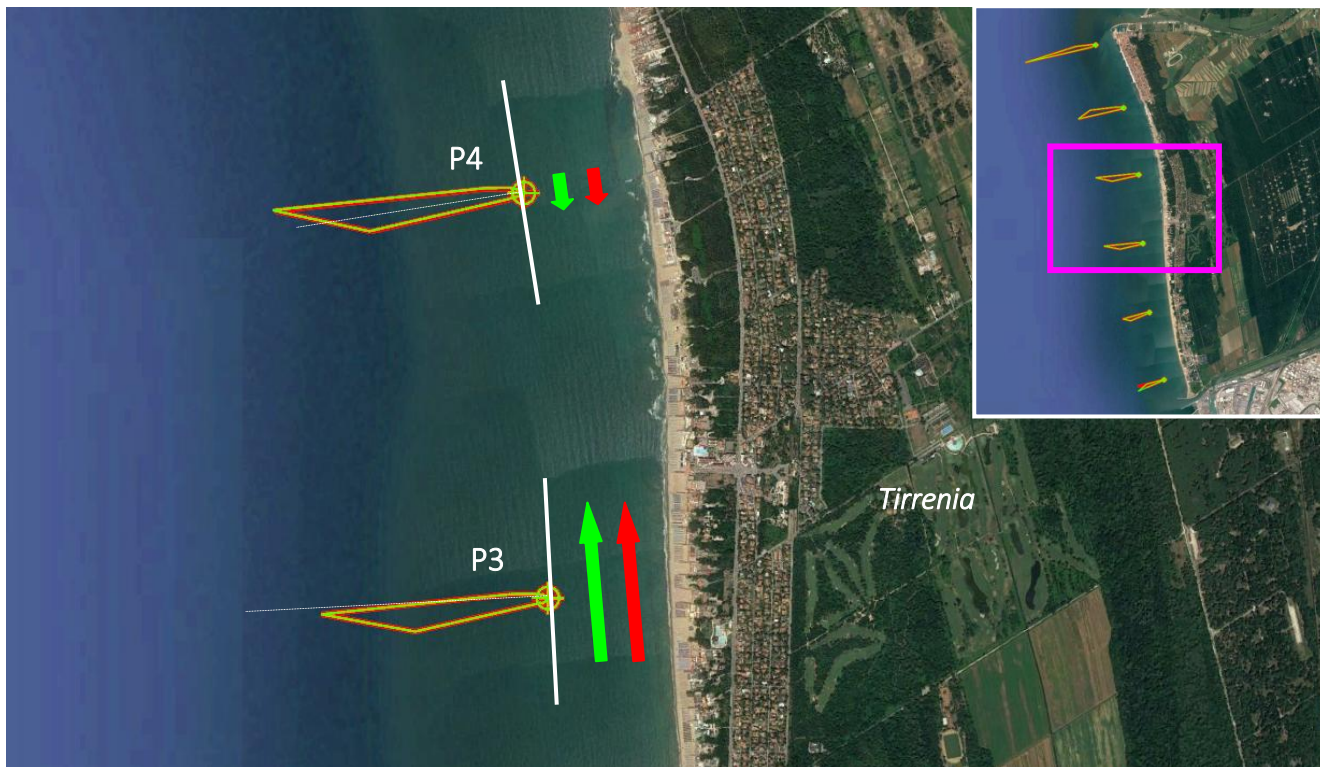


Figura 4.4 - Direzione del trasporto potenziale per il secondo tratto a Nord dello Scolmatore (litorale di Tirrenia) Confronto flussi in configurazione attuale del porto (verde) e di progetto (rosso)



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

IDRAULICA MARITTIMA

1233\_PP-D-002\_0.docx

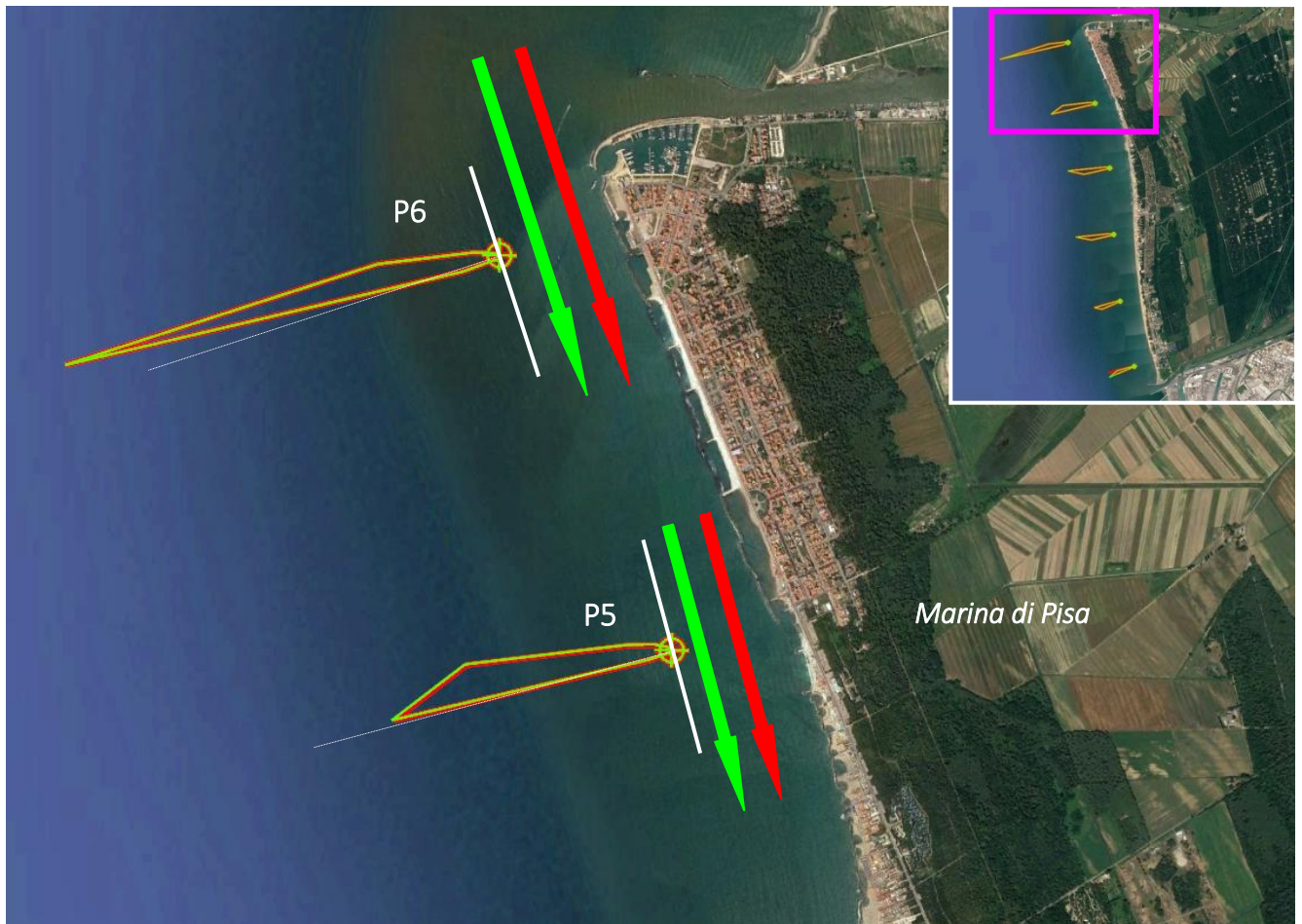


Figura 4.5- Direzione del trasporto potenziale per il terzo tratto a Nord dello Scolmatore (litorale di Marina Di Pisa)  
Confronto flussi in configurazione attuale del porto (verde) e di progetto (rosso)