

Studi costieri

Dinamica e difesa dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

N. 13
2007



Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Collana diretta da:

Enzo Pranzini

Dipartimento di Scienze della Terra
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze
Tel. 055 2479241 - Fax 055 2001618
E-mail: enzo.pranzini@unifi.it

Redazione: **Serena Ferri**

E-mail: serena.ferri@unifi.it

Comitato scientifico

Segreteria: **Pierluigi Aminti**

Dipartimento di Ingegneria civile
Via S. Marta, 3 - 50139 Firenze
Tel. 055 4796224 - Fax 055 495333
E-mail: aminti@dicea.unifi.it

Carlo Bartolini - Firenze
Edoardo Benassai - Napoli
Antonio Brambati - Trieste
Leandro D'Alessandro - Chieti
Giuliano Fierro - Genova
Leopoldo Franco - Roma
Giovanni Battista La Monica - Roma
Alberto Lamberti - Bologna
Gianfranco Liberatore - Udine

Elvidio Lupia Palmieri - Roma
Giuseppe Matteotti - Padova
Alberto Noli - Roma
Arturo Ragone - Napoli
Giulio Scarsi - Genova
Umberto Simeoni - Ferrara
Sandro Stura - Genova
Ugo Tomasicchio - Bari
Marcello Zunica - Padova

Stampato presso
Nuova Grafica Fiorentina
Via Traversari, 76
50126 Firenze

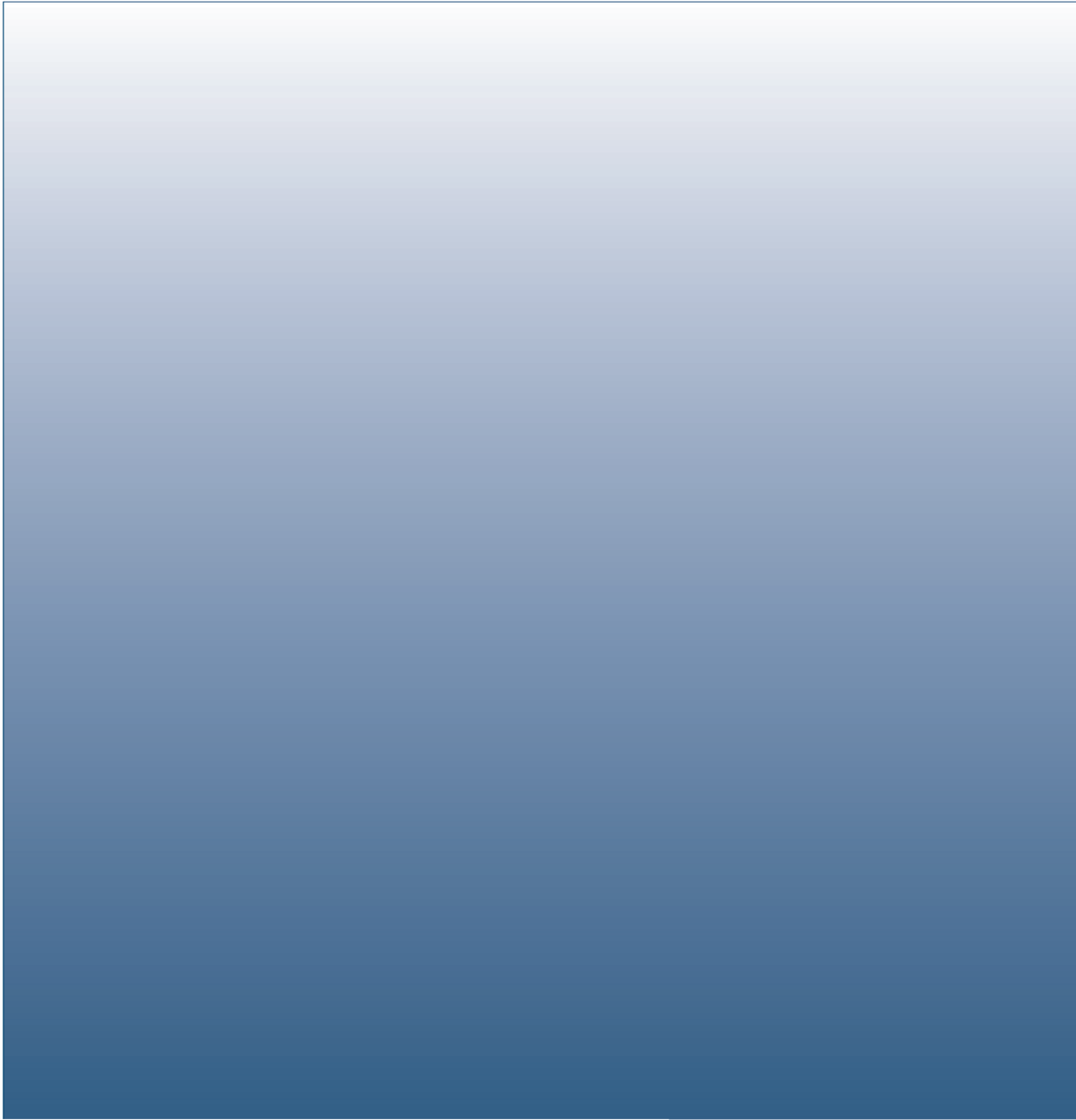
Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Numero 13

Indice

- Analisi della vulnerabilità dei litorali sabbiosi dell'Area Marina Protetta (Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre)** pag. 3-11
Simone Simeone, Claudia Dessy, Felice Di Gregorio, Bruno Paliaga, Andrea Cucco, Giovanni De Falco
- Criteri di progettazione degli argini di difesa a mare** pag. 13-33
Applicazione alla foce del fiume Ombrone
Claudia D'Eliso e Pier Luigi Aminti
- Studio del trasporto sedimentario su spiagge a granulometria mista tramite traccianti fluorescenti: applicazioni a Porto Recanati (MC)** pag. 35-51
Emanuele Castiglione, Paolo Ciavola e Simone Caleffi
- Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano** pag. 53-74
Manuela Gardelli, Simone Caleffi e Paolo Ciavola
- Caratterizzazione morfologico-dinamica e meteomarina della costa molisana nel settore compreso tra la foce del torrente Sinarca e Campomarino Lido (Molise, Italia meridionale)** pag. 75-92
Pietro Patrizio Ciro Aucelli, Tommaso De Pippo, Emanuela Iannantuono e Carmen Maria Roskopf
- I fenomeni d'instabilità nell'evoluzione della costa alta delle Cinque Terre (Liguria Orientale)** pag. 93-109
Andrea Cevasco
- La compatibilità chimica nel ripascimento con sabbie relitte: il caso degli elementi in traccia a Montalto di Castro (VT).** pag. 111-120
Daniela Paganelli, Chiara Maggi, Massimo Gabellini
- Recensioni**
- Le dighe marittime Progettazione, Realizzazione, Dissesti, Manutenzione (E. Benassai) pag. 121-122
Pierluigi Aminti
- La forma delle coste: geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali (E. Pranzini) pag. 123-124
Luciano Surace
- Norme per gli autori** pag. 125-126



Gruppo Nazionale per la
Ricerca sull'Ambiente Costiero

ISSN 1129-8588

Analisi della vulnerabilità dei litorali sabbiosi dell'Area Marina Protetta (Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre)

**Simone Simeone¹, Claudia Dessy², Felice Di Gregorio², Bruno Paliaga³,
Andrea Cucco⁴, Giovanni De Falco⁴**

¹Fondazione IMC - Centro Marino Internazionale, ONLUS.

Loc. Sa Mardini - 09072 Torregrande Oristano. Email: s.simeone@imc-it.org

²Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Cagliari. Via Trentino, 51- 09127 Cagliari.

³Area Marina Protetta Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre. P.zza Eleonora, 1 - 09127 Cabras, Oristano.

⁴IAMC - CNR - Istituto per l'Ambiente Marino Costiero, Sezione di Oristano.

Loc. Sa Mardini - 09072 Torregrande, Oristano.

Riassunto

E' stato predisposto ed applicato un modello utile a classificare le spiagge dell' area costiera dell'Area Marina Protetta (AMP) Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre e ad analizzare la capacità di recupero delle stesse rispetto a fattori naturali ed antropici. La classificazione dei tratti costieri è stata attuata utilizzando metodi di statistica multivariata (analisi fattoriale di tipo R e di tipo Q), analizzando le relazioni tra una serie di variabili rilevate su 13 tratti costieri.

L'analisi fattoriale di tipo R ha consentito di estrarre tre fattori, che spiegano l'80% della varianza totale, ed ha permesso di individuare le associazioni di variabili che più influenzano la fascia costiera indagata.

L'analisi fattoriale di tipo Q ha permesso di classificare i tratti costieri e di raggrupparli identificando, per gruppi, quali tratti hanno maggiore capacità di recupero rispetto a eventi naturali o a modificazioni di tipo antropico. Sulla base dei risultati ottenuti dalle analisi si sono individuati i tratti della fascia costiera dell'AMP più vulnerabili.

Le informazioni ottenute sono state georeferenziate e inserite in ambiente GIS. I risultati ottenuti sono stati forniti all'Ente gestore al fine di facilitare i compiti dello stesso nell'amministrazione della fascia litorale all'interno dell'AMP.

Parole chiave: Area Marina Protetta, fascia costiera, analisi fattoriale.

Abstract

A model to classify the beaches of the Marine Protected Area (MPA) Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre, has been implemented in order to analyze the recovery capacity of the investigated beaches respect to extreme events and anthropogenic disturbance.

Multivariate statistic (R and Q factor analysis) has been used to classify the beaches and to analyze the relationship between 9 variables computed for 13 coastal tracts.

Results obtained by R Factor analysis reveal the existence of three factors that explain the 80 % of the total variance. The group of variables extracted allows to define the main characteristics of coastal area of MPA.

On the other hand the Q factor analysis allows to classify the beaches of the MPA and to determine the recovery capacity of each coastal tract. From the results, the most vulnerable tracts of coastal area of MPA have been identified.

The information has been georeferenced and implemented in a GIS, and provided to the administrators of the MPA in order to support the decision making procedures.

Keywords: *Marine Protected Area, coastal zone, factor analysis.*

Introduzione

La gestione della fascia costiera è una tematica sempre più rilevante e di cruciale importanza al fine di pianificare uno sviluppo sostenibile della stessa. La pianificazione e lo sviluppo della fascia costiera hanno necessità di una base conoscitiva dei processi fisici ed antropici che insistono su di essa.

In particolare al fine di supportare i processi decisionali è necessario individuare quali tratti della fascia costiera risultano più vulnerabili sia rispetto a forzanti naturali che verso perturbazioni antropiche.

I modelli di vulnerabilità costiera adottati in letteratura sono stati sviluppati rispetto all'innalzamento del livello del mare (Gambolati et al., 2002; Gornitz, 1990, Gornitz et al., 1994), agli eventi di tempesta (Mendoza e Jimenez, 2004, Thieler e Hammr-Klose, 1999), all'urbanizzazione e uso del suolo della fascia costiera (Dal Cin e Simeoni, 1996) o anche alla *carrying capacity* (Arisci et al., 2002). Scopo del lavoro è fornire una indicazione sui tratti maggiormente vulnerabili rispetto sia a fattori naturali che antropici della fascia costiera dell'AMP Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre. In particolare è stata effettuata una classificazione della fascia costiera dell'Area Marina Protetta (AMP) Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre finalizzata all'identificazione della capacità di recupero dei litorali sabbiosi in relazione a perturbazioni indotte da forzanti naturali (i.e. mareggiate, eventi di tempesta) ed a forzanti antropiche (urbanizzazione, modificazione assetto geomorfologico). Al fine di supportare le scelte pianificatrici dell'Ente Gestore dell'AMP si sono identificati i tratti costieri più vulnerabili.

Per la classificazione dei tratti costieri dell'AMP Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre è stato utilizzato il metodo proposto da Dal Cin e Simeoni (1987, 1996) modificato e adattato al contesto investigato.

L'area in esame comprende tutta la fascia costiera dell'Area Marina Protetta Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre ed in particolare gli ambienti sabbiosi della stessa (Fig. 1, Fig. 2).

Area di Studio

L'area di studio, comprendente i litorali sabbiosi dell'Area Marina Protetta Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre, è localizzata nel settore centro-occidentale della Sardegna (Fig. 1). Il tratto di litorale preso in considerazione risulta incluso interamente nelle sezioni III e IV del Foglio 528 dell'IGM, serie pubblicata nel 1992, in scala 1:25.000.

La geologia dell'area è caratterizzata da una sequenza neogenica di rocce vulcaniche e sedimentarie di origine marina con un piccolo plateau basaltico Pliocenico.

Il basamento cristallino paleozoico affiora nell'isola di Mal di Ventre e lungo la piattaforma continentale (Fais, Klingele e Lecca, 1996; Marini e Murru, 1977).

La piattaforma continentale è caratterizzata dalla presenza di un ripiano strutturale (Mesa de Maluentu-Catalano, Carboni et al., 1989) profondo circa 40-50 m con deboli spessori di sedimento. I fondali della zona costiera, antistante le spiagge, sono prevalentemente rocciosi e ampiamente colonizzati dalla *Posidonia oceanica*. La prateria è impostata su una matre di circa 50 cm, costituita da sedimenti carbonatici biogenici poggiati sul substrato roccioso. Zone limitate di accumulo di sedimenti sono presenti in settori ristretti antistanti le spiagge (De Falco et al., 2003) (Fig. 1). I sedimenti di spiaggia sono costituiti da sabbie grossolane quarzose e da sabbie carbonatiche granulometricamente più fini, le quali diventano predominanti verso sud. Importanti fenomeni erosivi si riscontrano nella spiaggia di San Giovanni, tratti 10 e 11 in Figura 2 (Spano, 1956, De Falco e Piergallini, 2003) e nella spiaggia di Is Arutas, tratto 4 in Figura 2 (De Falco e Piergallini, 2003). Non esistono tuttavia dati quantitativi sui fenomeni di erosione che consentano una valutazione dell'entità e delle cause del fenomeno e dei processi in atto, è comunque noto che tali tratti litorali sono stati sottoposti ad intensa pressione antropica negli ultimi 40 anni con costruzione massiccia di seconde case e prelevamento di sabbia dal retrospiaggia a fini edilizi (De Falco e Piergallini, 2003)

In questo settore della Sardegna il maestrone (direzione NW) rappresenta il vento dominante durante l'anno (Pinna, 1989), la direzione prevalente di provenienza delle mareggiate è 305° N (Atzeni et al 2003).

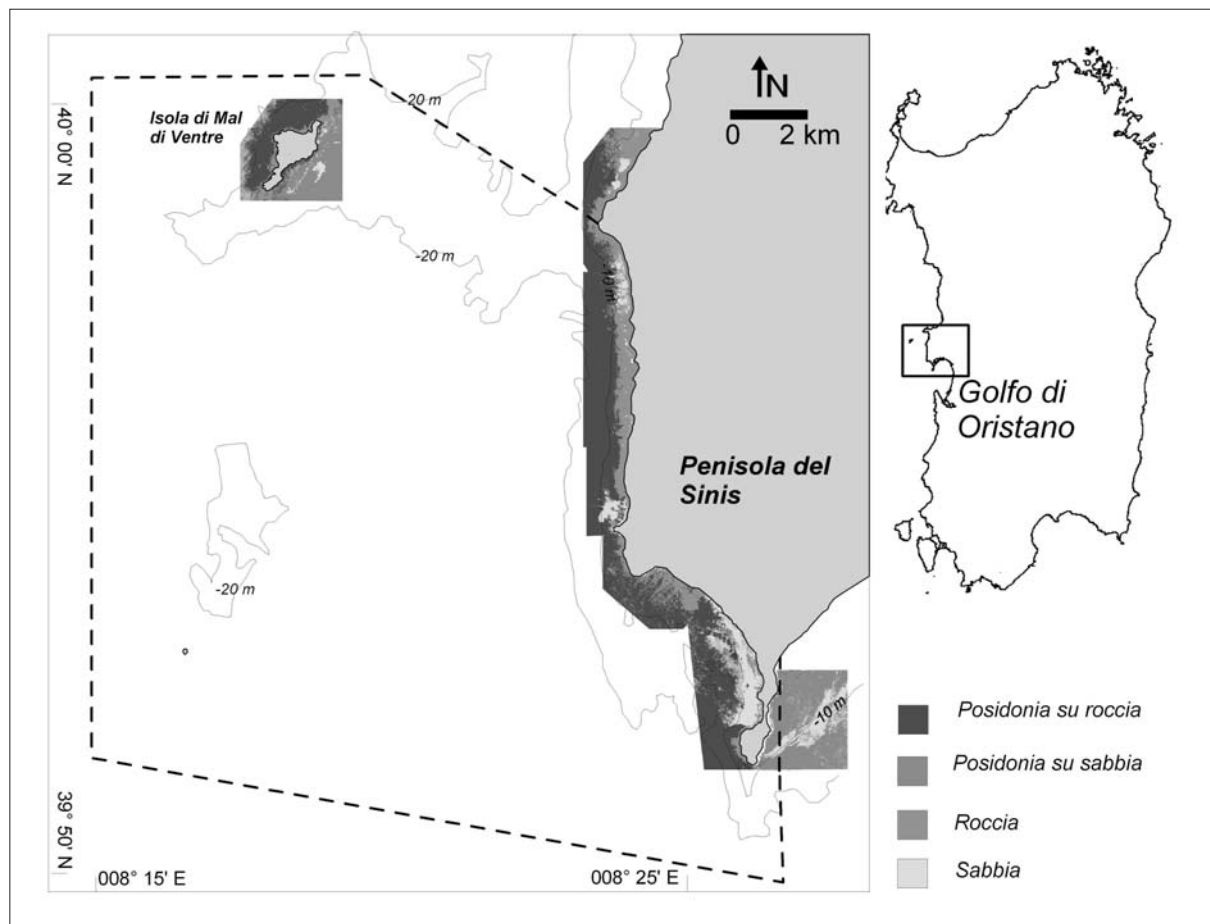


Figura 1 - Carta delle biocenosi costiere (Baroli et al, 2006). La porzione tratteggiata identifica l' Area Marina Protetta Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre.

Materiali e metodi

I tratti costieri sono stati classificati utilizzando e adattando, per l'area in esame, il modello proposto da Dal Cin e Simeoni (1987, 1996). Il metodo consente di classificare la fascia costiera sulla base di un'analisi statistica multivariata di un set di dati comprendente n variabili e m tratti costieri.

Il set di dati per l'area di studio in esame comprende 9 variabili (Tab. 1) e 13 tratti costieri (Fig. 2). Le variabili utilizzate possono essere suddivise in variabili idrodinamiche, evolutive, morfologiche, sedimentologiche e antropiche.

Tabella 1 - Variabili analizzate per la classificazione delle spiagge.

1) Energia media annua (GN m/m)	Variabile idrodinamica
2) Evoluzione linea di riva tra il 1960 e il 2000 (m/40 anni)	Variabile evolutiva
3) Larghezza massima spiaggia emersa (m)	Variabili morfologiche
4) Inclinazione media spiaggia emersa (%)	
5) Inclinazione media spiaggia sommersa tra 0 e -3 metri (%)	
6) Superficie sabbia della spiaggia sommersa (km ²)	Variabili sedimentologiche
7) Granulometria media dei sedimenti di spiaggia (battigia) (mm)	
8) Contenuto in carbonati (%)	Variabile antropica
9) Superficie antropizzata (adimensionale)	

La costa dell'Area Marina Protetta è stata suddivisa in 13 tratti costieri, la suddivisione è stata fatta in base alle caratteristiche morfologiche della fascia costiera analizzata e all'uso del suolo nell'immediato retrospiaggia. In particolare ciascuno dei 13 tratti costieri corrisponde ad una spiaggia, separata dalle altre da promontori rocciosi. Dove non è stato possibile associare una singola spiaggia ad un tratto costiero (i.e. tratti 1, 2 e tratti 7, 8), la spiaggia è stata suddivisa in due tratti in base alla differente morfologia ed in base al differente uso del suolo del retrospiaggia.

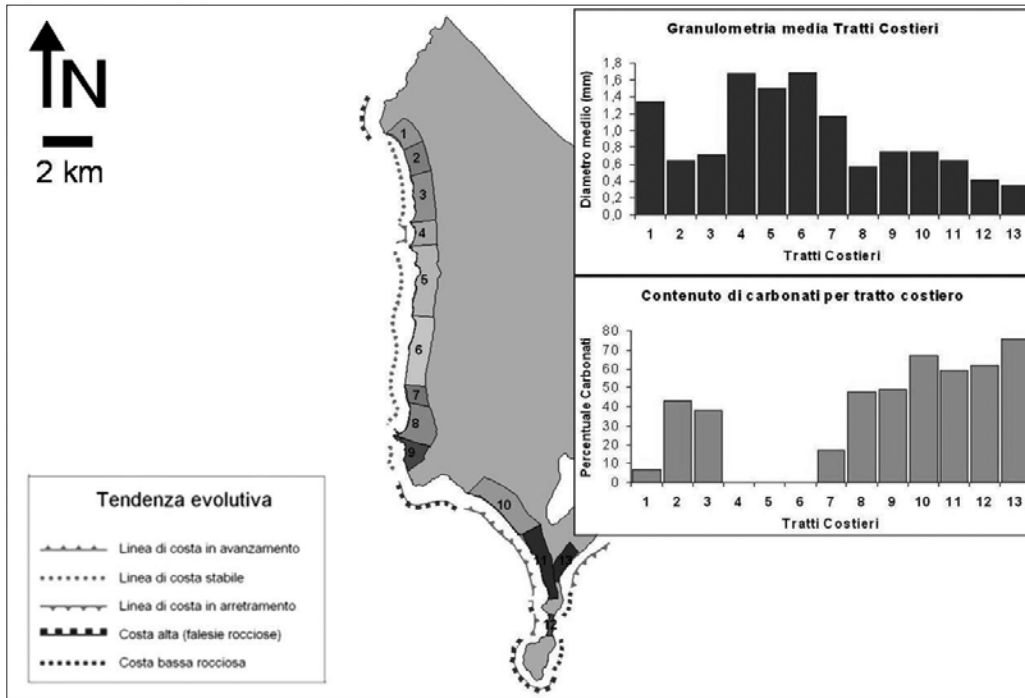


Figura 2 - Tratti costieri analizzati e relative caratteristiche sedimentologiche e mineralogiche.

Il valore della variabile idrodinamica (i.e. variabile 1) è stato estratto da Atzeni et al. (2004). Per il calcolo della variabile 2 ci si è riferiti a sia a studi pubblicati (Spano 1956, De Falco e Piergallini 2003) che a rilievi effettuati con il sistema GPS differenziale (DGPS) Ashtech Promark 2 con il quale è stata rilevata la linea di riva di tutte le spiagge dell'AMP. La tendenza della linea di riva è stata quindi ottenuta per ogni spiaggia dall'analisi delle differenti linee di riva disponibili in bibliografia (De Falco e Piergallini, 2003).

Le variabili morfologiche (i.e. variabili 3, 4, 5, 6) sono state rilevate in campo mediante l'utilizzo del sistema DGPS Ashtec Pro Mark II, in modalità cinematica (Morton et al., 1993; Haxel e Holman 2004). In particolare per la variabile 3, nel settore di massimo sviluppo della spiaggia emersa è stata misurata la massima larghezza della spiaggia dal solco di battigia al piede della duna lungo tre profili. Il valore della variabile è il valore medio ricavato dai tre valori misurati. Il valore della variabile 4 è stato ottenuto come media dei tre valori di pendenza misurati lungo i profili eseguiti per il calcolo della variabile 3. In continuità con i profili di spiaggia emersa sono stati rilevati tre profili di spiaggia sommersa, dal solco di battigia fino alla profondità dei tre metri, la pendenza media (variabile 5) è stata ottenuta come media dei tre valori di pendenza misurati. Si è considerata la profondità di tre metri in quanto, in tutto il settore occidentale dell'area di studio a tale batimetria affiora il fondale roccioso, mentre nei tratti interni al Golfo di Oristano (i.e. tratto 13) a tale profondità è riferibile il limite superiore della prateria di Posidonia oceanica.

La superficie di spiaggia sommersa coperta da sedimento (variabile 6) è stata quantificata attraverso analisi d'immagine di foto aeree utilizzando il software Multiscope® (Baroli et al, 2003); l'estensione dell'area considerata è stata determinata in base alla profondità di chiusura per ciascun tratto costiero.

I valori delle variabili 7 e 8 per alcuni tratti costieri sono stati estratti da De Falco et al. (2003) e Baroli et

al. (2003), per i tratti 5, 9 e 10, si è proceduto ad un campionamento di sedimento di battigia in almeno tre stazioni per ogni spiaggia. I campioni raccolti sono stati analizzati con granulometro laser Galai CIS 1 ed il valore del diametro medio è stato ottenuto con il metodo dei momenti attraverso il software GRADI-STAT (Blott et al 2001). I valori utilizzati sono i valori medi ottenuti dalla media delle tre stazioni.

La variabile 9 si riferisce all'area occupata da manufatti, strutture antropiche e strade sulla superficie totale del tratto costiero, tale valore è stato determinato mediante analisi d'immagine di foto aeree ed ortofoto in ambiente ESRI - ARCGIS®.

I dati così ottenuti (9 variabili, 13 casi) sono stati standardizzati (rank method) e sottoposti all'analisi fattoriale di tipo R condotta con il software Statistica® 6.0 (StatSoft®), ciò ha permesso di raggruppare le variabili al fine di individuare le loro correlazioni.

La stessa matrice è stata trasposta e analizzata attraverso analisi fattoriale di tipo Q.

I valori ottenuti da questa ultima analisi sono stati normalizzati e rappresentati in un diagramma ternario al fine di raggruppare e classificare i tratti costieri.

Sulla base dei risultati ottenuti dalle due analisi è stato possibile individuare quali tratti costieri sono maggiormente vulnerabili verso perturbazioni di origine antropica e quali verso fattori naturali.

Tabella 2 - Valori delle variabili per ogni tratto costiero, i tratti costieri sono stati numerati in ordine crescente da Nord a Sud.

Tratto costiero	Variabili								
	Idrodinamica	evolutiva	sedimentologiche				antropica		Morfologiche
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	132	-7,8	20,2	9,56	6,4	0,002	1,35	7,84	0,047
2	132	1,7	29,8	7,05	3,2	0,099	0,62	43	0,087
3	132	1,5	18,3	12,1	2	0,177	0,71	38,92	0,085
4	132	-16,6	22,2	10	6,4	0,014	1,68	0	0,219
5	132	3,2	10	8	2,9	0,012	1,49	0,06	0,047
6	132	3,5	15	7,86	2,8	0,02	1,65	0,13	0,037
7	132	-6,3	50	5,32	4	0,021	1,17	17,56	0,123
8	132	0,8	44	7,8	2,4	0,235	0,57	48,23	0,035
9	132	0,5	25	9,1	1,4	0,001	0,75	49,17	0,034
10	53	-12,1	20	7,2	1,8	0,103	0,75	67,15	0,069
11	65	-12,6	40	9,05	2,2	0,949	0,65	59,47	0,523
12	65	-10,2	35	5,6	1,9	0,478	0,41	62,03	0,161
13	1	18,6	12,2	9,38	1,1	0,088	0,35	76,28	0,094

Risultati

L'analisi fattoriale dei di tipo R ha raggruppato le 9 variabili considerate in tre fattori, che spiegano l' 80,06 % della varianza totale (Tab. 3).

Tabella 3 - Risultati dell'analisi fattoriale.

Variabili	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 3
<i>Energia media annua GNm/m</i>	-0,86	-0,32	0,14
<i>Evoluzione (1960-2000) (m)</i>	0,11	-0,84	-0,13
<i>Pendenza media Spiaggia emersa (%)</i>	-0,13	0,09	-0,83
<i>Pendenza media Spiaggia sommersa(%)</i>	-0,88	0,24	0,15
<i>Larghezza max Spiaggia emersa (m)</i>	-0,04	0,39	0,83
<i>Granulometria media (mm)</i>	-0,84	0,05	-0,35
<i>Carbonati (%)</i>	0,95	0,04	0,16
<i>Area urbanizzata/area totale</i>	0,18	0,85	0,04
<i>Superficie sabbia fondale km2</i>	0,61	0,38	0,43
Varianza spiegata %	39,29%	21,11%	19,66%
Varianza totale	80,06%		

Il primo fattore raggruppa variabili legate alla morfodinamica dell'ambiente di spiaggia.

Il fattore 1 indica che nell'area considerata i tratti costieri in cui è presente un forte idrodinamismo, un'elevata pendenza della spiaggia sommersa e che sono costituiti da sabbia grossolana non hanno rifornimento di sabbia biogenica carbonatica e presentano uno scarso sviluppo della spiaggia sommersa.

Il fattore 2 indica che nelle spiagge maggiormente antropizzate è presente un forte processo erosivo, mentre il fattore 3 indica che le spiagge più larghe hanno anche una bassa pendenza della spiaggia emersa.

L'analisi fattoriale di tipo Q ha permesso di raggruppare le spiagge in tre fattori, i valori dei pesi fattoriali sono stati normalizzati e inseriti in un diagramma ternario al fine di individuare i tratti costieri più simili.

In Fig. 3 si illustra la suddivisione dei tratti costieri ottenuta dopo la normalizzazione dei pesi ottenuti dall'analisi fattoriale.

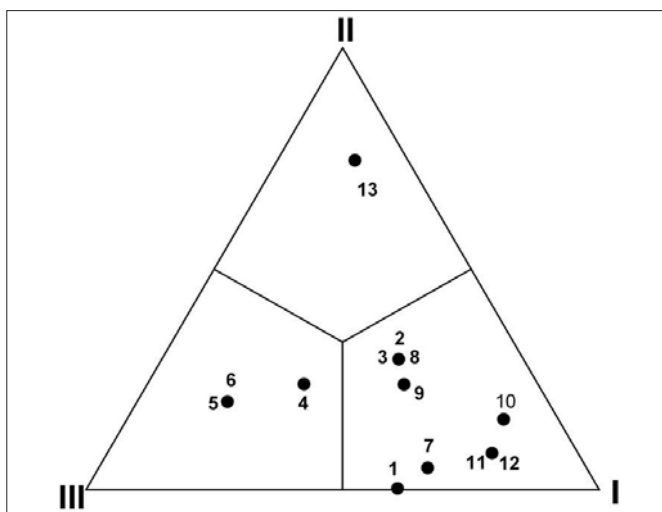


Figura 3 - Diagramma ternario dei pesi fattoriali normalizzati dei 13 tratti costieri considerati (da Dal Cin e Simeoni 1994).

L'analisi fattoriale di tipo Q evidenzia la suddivisione dei tratti in tre gruppi. Da notare che alcuni tratti, date le forti similarità morfologiche coincidono perfettamente (i.e. 6, 5; 11, 12; 2, 8, 3; in Fig. 3 e Tab. 4).

Tabella 4 - Pesi fattoriali normalizzati ottenuti dalla analisi fattoriale di tipo Q.

Tratti Costieri	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 3
1	0,61	0,00	0,39
2	0,46	0,30	0,24
3	0,46	0,30	0,24
4	0,30	0,24	0,46
5	0,18	0,20	0,62
6	0,18	0,20	0,62
7	0,64	0,05	0,31
8	0,46	0,30	0,24
9	0,50	0,24	0,26
10	0,73	0,16	0,11
11	0,75	0,08	0,17
12	0,75	0,08	0,17
13	0,15	0,75	0,10
Varianza spiegata %	54,35%	16,60%	27,04%

I gruppi ottenuti sono 3: A, B, C; il gruppo A identifica i tratti che correlano maggiormente con il fattore 1, il gruppo B raggruppa i tratti che correlano maggiormente con il fattore 2, mentre il gruppo C comprende i tratti maggiormente correlati con il fattore 3 (Fig. 3).

Il gruppo A comprende i tratti 1, 7, 12, 11, 10, 9, 8, 2, 3; il gruppo B include il solo tratto 13, mentre il gruppo C include i tratti 5, 6, 4.

Discussione

L'analisi fattoriale di tipo R permette di raggruppare le variabili al fine di comprendere come queste caratterizzino i tratti costieri analizzati.

Dall'analisi fattoriale di tipo R emerge che l'area costiera analizzata è costituita da spiagge con caratteristiche differenti. Infatti le spiagge che hanno una ampia spiaggia sommersa sono costituite per la maggior parte da sedimento carbonatico biogenico, hanno un minor idrodinamismo, granulometria media più fine e pendenza della spiaggia sommersa più lieve, rispetto alle spiagge con granulometria grossolana, assenza o bassa percentuale di sedimento carbonatico e forte idrodinamismo. Le spiagge maggiormente antropizzate sono anche quelle in cui è in atto un processo erosivo. Inoltre, le spiagge con maggior sviluppo della spiaggia emersa presentano un profilo meno pendente di quelle con retrospiaggia più stretto.

L'analisi fattoriale di tipo Q ha permesso di classificare e raggruppare i tratti costieri. In Fig. 3 sono mostrati i gruppi ottenuti dopo la normalizzazione dei risultati dell'analisi fattoriale di tipo Q.

Il primo gruppo, gruppo A, può suddividersi in tre sottogruppi: il primo, A1, comprendente i tratti 12, 11, 10, caratterizzato da spiagge costituite prevalentemente da sedimento biogenico, da ampio sviluppo della spiaggia sommersa e della spiaggia emersa, ma con in atto un trend erosivo ed una intensa antropizzazione dei tratti 11 e 12; il secondo, sottogruppo A2, comprendente i tratti 2, 3, 8, 9 caratterizzato da tratti costieri che hanno tendenza alla stabilità, da grandi quantità di sedimento biogenico carbonatico, da alto idrodinamismo e da ampio sviluppo della spiaggia sommersa per i tratti 3 e 8; il terzo sottogruppo, A3, include i tratti 1 e 7. Tali tratti sono caratterizzati da elevato idrodinamismo, preponderanza di sedimenti silicoclastici, tendenza erosiva in atto, buono sviluppo della spiaggia emersa ma scarso sviluppo della spiaggia sommersa e granulometria grossolana.

Il secondo gruppo, gruppo B, include il solo tratto 13, che presenta caratteristiche totalmente differenti dagli altri in quanto è l'unico interno al Golfo di Oristano ed è caratterizzato da granulometria più fine e idrodinamismo molto basso.

Il terzo gruppo, gruppo C, comprende i tratti 4, 5, 6. Tale gruppo include tratti costieri caratterizzati da elevato idrodinamismo, assenza di rifornimento sedimentario biogenico, granulometria grossolana, con uno sviluppo moderato della spiaggia emersa e con totale assenza di spiaggia sommersa. I tratti 5, 6 sono tendenzialmente stabili, mentre il tratto 4 ha una tendenza erosiva in atto e una intensa antropizzazione alle spalle. Dai risultati ottenuti con le analisi fattoriali di tipo R e di tipo Q si può individuare il grado di risposta dei tratti costieri alle perturbazioni esterne di natura antropica e/o naturale e quindi individuare quali sono i tratti più vulnerabili dell'area costiera individuata.

I tratti raggruppati nel gruppo A1 hanno una buona capacità di recupero rispetto a forzanti naturali, anche estreme come le mareggiate di elevata intensità. In tal caso la struttura morfo sedimentologica permette a tali tratti di rispondere alle perturbazioni naturali. Tali spiagge hanno però un elevato tasso di antropizzazione che le rende vulnerabili rispetto a perturbazioni antropiche, quali edificazione del retrospiaggia o prelievo di sedimento. Tali interventi diminuirebbero anche la capacità di recupero da eventi naturali.

I tratti compresi nel gruppo A2 hanno una buona capacità di recupero rispetto a forzanti naturali, ma essendo costituite prevalentemente da sedimento silicoclastico relitto, hanno una minor resilienza rispetto ad interventi antropici che lo mobilitano direttamente o che ne causino un trasferimento indirettamente.

Il gruppo A3 comprende tratti con una minor capacità di recupero da fattori naturali, e una molto bassa capacità di recupero da perturbazioni di tipo antropico. Anch'essi infatti sono costituiti prevalentemente da sedimenti relitti.

In definitiva i tratti compresi nel gruppo A presentano una moderata vulnerabilità rispetto a fenomeni naturali, ma una elevata vulnerabilità rispetto a modificazioni del loro stato da parte di interventi antropici.

Il gruppo B comprende il tratto 13 che non subisce, data la sua posizione all'interno del Golfo di Oristano, grosse perturbazioni da agenti naturali, e potrebbe avere una buona resilienza anche rispetto ad interventi

antropici. Questo tratto è quindi il meno vulnerabile per quanto concerne l'azione di forzanti sia naturali che di origine antropica.

Infine il gruppo C comprende i tratti più vulnerabili, sia in relazione a perturbazioni naturali (eventi estremi), che a forzanti di tipo antropico, infatti tali tratti sono costituiti solo da sedimenti relitti, hanno scarso sviluppo della spiaggia sommersa, la spiaggia emersa è poco sviluppata o in netta erosione (tratto 4). In questi tratti, una mobilitazione di sedimento potrebbe portare a drastici cambiamenti degli equilibri morfodinamici.

Conclusioni

La metodologia utilizzata nel presente lavoro è stata adattata alle condizioni specifiche dei litorali dell'Area Marina Protetta della Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre ed è risultata utile per classificare i vari tratti di costa e individuare quali sono i tratti con capacità di recupero maggiore rispetto a perturbazioni esterne di tipo naturale (mareggiate e o tempeste) o di tipo antropico (urbanizzazione del retrospiaggia, mobilitazione sedimento).

Dallo studio è emerso quale associazione di variabili influenza maggiormente la fascia costiera dell'Area Marina Protetta che presenta spiagge con caratteristiche differenti, in particolare: i) le spiagge più energetiche hanno sedimento grossolano silicoclastico, con mancanza di rifornimento di sedimenti biogenici dalle praterie di Posidonia, e presentano spiaggia sommersa poco sviluppata; ii) le spiagge più antropizzate hanno dei processi erosivi in atto; iii) le spiagge con retrospiaggia più ampia hanno un profilo del retrospiaggia lieve. Inoltre i tratti costieri possono essere raggruppati in tre gruppi: i) il primo gruppo comprende tratti con buona o media capacità di recupero rispetto a perturbazioni naturali, ma con diversa capacità di recupero rispetto a perturbazioni antropiche; ii) il secondo gruppo, che include il solo tratto 13, ha una buona capacità di recupero sia rispetto a fattori naturali che antropici; iii) il terzo gruppo comprende tratti con bassa capacità di recupero sia rispetto a perturbazioni naturali che antropiche.

L'importanza dei risultati conseguiti consiste nel fatto che la metodologia può essere utilmente applicata anche a litorali differenti da quelli indagati. Infatti le variabili da prendere in considerazione non sono fisse ma debbono essere scelte in base alle caratteristiche e peculiarità dei tratti investigati.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato finanziato dall' Area Marina Protetta – Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre. Si ringraziano il Dr. Antonello Gellon e il Dr. Beppe Piergallini per l'assistenza durante le campagne di campionamento. Un grazie sentito va al Prof. Umberto Simeoni per gli utili suggerimenti nella revisione del lavoro.

Bibliografia

- Arisci A., De Waele J., Di Gregorio F., Ferrucci I., Follesa R., Piras G. (2002) - *Proposta di un modello di sviluppo sostenibile per le spiagge e le aree costiere dell'Isola di Sant'Antioco (Sardegna SO, Italia)*. Studi costieri, 5: 59-75.
- Atzeni A. (2003) - *Effetti idrodinamici sulle spiagge della costa occidentale della Sardegna*. Studi Costieri, 7: 61-80.
- Atzeni A., De Muro S., Di Gregorio F., Piras G. (2004) - *Map of geo-environmental hazard on the coast of Sardinia (Italy), Scale 1:300.000*. S.E.L.C.A. Firenze (Italy).
- Baroli M., De Falco G., Antonimi, C., Coppa, S., Facheris, C. (2006). *Analisi della distribuzione e struttura della popolazione di *Paracentrotus lividus* finalizzata alla gestione della pesca del riccio di mare nell' Area Marina Protetta Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre (Sardegna Occidentale)*. Biologia Marina Mediterranea, 13 (1): 326-333.
- Baroli M., De Falco G., Piergallini G. (2003) - *Cartografia ad alta risoluzione dei popolamenti bentonici della fascia costiera dell'Area Marina Protetta della Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre finalizzata alla gestione del diporto nautico*. Biologia Marina Mediterranea, 10: 644-646.
- Blott J. S., Pye K. (2001). *Gradistat : A Grain Size Distributions and Statistics Package for the analysis of unconsolidated sediments*. Earth Surface Process and Landforms, 26: 1237-1248.
- Carboni S., Lecca L., Ferrara C. (1989). *La discordanza versiliana sulla piattaforma continentale occidentale della Sardegna*. Bollettino della Società Geologica Italiana, 108: 503-519.

- Cherchi A., Marini A., Murru M., Robba E. (1978) - *Stratigrafia e paleoecologia del Miocene superiore della Penisola del Sinis (Sardegna occidentale)*. Rivista Italiana Di Paleontologia, vol. 84, n° 4, 973-1036, tav. 91-94. Milano, 1978.
- Dal Cin R., Simeoni U. (1996) - *A model for determining the classification, vulnerability and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy)*. Journal of Coastal Research, 10(1): 18-29.
- Dal Cin R., Simeoni U. (1987) - *Analisi ambientale quantitativa dei litorali marchigiani fra Gabicce e Ancona. Livello dl rischio naturale e del degrado, distribuzione dei sedimenti e loro possibile impiego per ripascimenti artificiali*. Bollettino della Società Geologica Italiana, 106: 377-423.
- De Falco G., Molinaroli E., Baroli M., Bellacicco S. (2003) - *Grain size and compositional trends of sediments from Posidonia oceanica meadows to beach shore, Sardinia, western Mediterranean*. Estuarine Coastal and Shelf Science, 58: 299-309.
- De Falco G., Piergallini, G. (2003) - *Mare, Golfo, Lagune Studi e Ricerche*. Editrice S'Alvure, Oristano.
- Fais S., Klingele, E. e Lecca, L. (1996) - *Oligo Miocene half graben structure in Western Sardinian Shelf (western Mediterranean): reflection seismic and aeromagnetic data comparison*. Marine Geology, 133(3-4): 203-222.
- Gambolati G., Teatini P., Gonella M. (2002) - *A Gis simulation of the inundation risk in the coastal lowland of the northern Adriatic Sea*. Mathematical and Computer Modelling, 35: 936-972.
- Gornitz V. (1990) - *Vulnerability of East Coast, U.S.A. to future sea level rise*. Journal of Coastal Research, Special Issue 9: 201-237.
- Gornitz V.M., Beaty T.W., Daniels R.C. (1994) - *A coastal hazard data base for the U. S. West Coast*. OAK Ridge National Laboratory, U. S. A. 150 pp.
- Haxel J.H., Homan R.A. (2004) - *The sediment response of a dissipative beach to variations in wave climate*. Marine Geology: 206, 73-99.
- Mendoza E.T., Jimenez J.A. (2004) - *Factors controlling vulnerability to storm impact along the Catalanian coast*. Proceeding of Coastal Engineering , 3087-3099.
- Morton R. A., Leach M. P., Paine J. G. and Cardoza M. A. (1993). *Monitoring Beach Changes Using GPS Surveying Techniques*. Journal of Coastal Research, 9 (3): 702-720.
- Spano P., Pinna M. (1956) - *Le spiagge della Sardegna*, CNR.
- Thieler E.R. and Hammar-Klose E.S. (1999) - *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Result for the U. S. Atlantic Coast*. United States Geological Survey.

Ricevuto il 23/03/2007, accettato il 14/09/2007.

Criteri di progettazione degli argini di difesa a mare. Applicazione alla foce del fiume Ombrone

Claudia D'Eliso¹ e Pier Luigi Aminti¹

¹DIC - Dipartimento di Ingegneria Civile, Via S. Marta 3, 50139 - Firenze

Riassunto

Gli argini di difesa a mare sono strutture di difesa della costa che si collocano a metà tra dighe costiere (*sea dikes*) e scogliere radenti. In Italia esistono pochi esempi di realizzazione e sono assimilati a scogliere radenti. Nell'ottica di una progettazione basata sul rischio di rottura della struttura, criteri e strumenti progettuali per gli argini di difesa a mare sono stati derivati da quelli disponibili per le dighe costiere e proposti in questo studio. In particolare, è stato recentemente sviluppato da uno degli autori un nuovo modello per la rottura di dighe costiere indotta da tracimazione ondosa che può essere applicato anche agli argini di difesa a mare. La foce del Fiume Ombrone in Toscana, è stata infine scelta come caso applicativo di alcuni dei criteri proposti.

Parole chiave: inondazioni costiere, argini di difesa a mare, rottura dell'argine, tracimazione ondosa, erosione.

Abstract

A sea levee (argini di difesa a mare) is a coastal defence structure in between sea dikes and rubble mound sea walls. In Italy there are few examples, normally associated to rubble mound sea walls. Under the perspective of a risk-based design of the structure, design criteria and tools for the sea levee have been derived from the available for sea dikes and herein proposed. In particular, a new model system for the breaching of sea dikes initiated by wave overtopping has been developed from one of the author and can be also directly applied to the sea levee. The Ombrone River mouth in Tuscany has been finally selected as a case study of some of the proposed criteria.

Keywords: coastal flooding, sea dikes, dike breaching, overtopping, erosion.

Introduzione

Gli argini di difesa a mare, definiti genericamente come la variante italiana delle dighe costiere (*sea dikes*) che difendono diffusamente le coste del Mare del Nord, proteggono la fascia costiera dalle inondazioni causate da mareggiate. In Italia, dove uno dei principali problemi della costa è l'erosione delle spiagge, gli argini di difesa a mare sono una tipologia strutturale poco diffusa, anche se rappresentano una valida possibilità di difesa in presenza di piane costiere basse, normalmente interessate anche da fenomeni di subsidenza e in previsione dell'innalzamento del livello medio del mare stimato per i prossimi decenni. Queste strutture possono ben integrarsi con il paesaggio costiero, hanno una buona efficienza e durata e un costo relativamente ridotto rispetto a opere a scogliera costruite in mare. Ai fini della progettazione, è necessario definire dei criteri progettuali specifici. In quest'ottica, occorre dare una definizione precisa di argine a mare, descriverne le caratteristiche, per poi indicare dei criteri progettuali recependo le indicazioni disponibili per le dighe costiere, che sono comunque ancora oggetto di ricerca per la comunità scientifica internazionale (Oumeraci, 2004). A conclusione dello studio si presenta un caso applicativo di alcuni dei criteri proposti (Fig. 1).

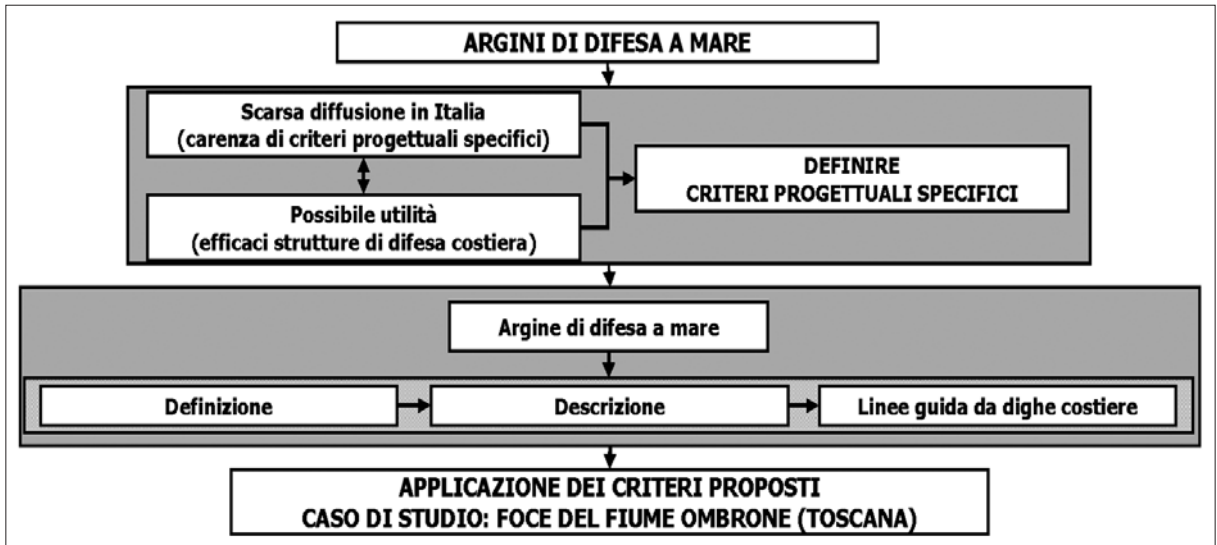


Figura 1 - Motivazione, obiettivo e metodologia dello studio.

Le dighe costiere e gli argini di difesa a mare

Le dighe costiere e gli argini di difesa a mare sono strutture in terra che impediscono, durante le mareggiate, l'inondazione della zona protetta, fissando rigidamente la linea di costa e identificando nettamente l'interfaccia mare-terra.

Le dighe costiere hanno un funzionamento simile a quello degli dighe fluviali, che svolgono un'analoga funzione di contenimento dell'acqua, anche se i carichi che gravano sulla struttura e le sezioni tipo sono diversi. Anche i cordoni dunali rappresentano una forma di protezione della fascia costiera dalle mareggiate e hanno un funzionamento per certi aspetti paragonabile alle dighe costiere, ma in questo caso il sistema di difesa è naturale e le dune non hanno una forma costante nel tempo o prestabilita su basi progettuali.

La necessità di realizzare dighe costiere si concentra lungo quei tratti di costa soggetti a forti escursioni mareali, ad alti sovralti indotti dal vento e dal gradiente barometrico e nel caso in cui la fascia costiera si collochi ad una quota molto ridotta o addirittura giaccia al di sotto del livello medio del mare (terre basse), perché interessata da fenomeni di subsidenza (ARPA, 2002) o dall'innalzamento del livello medio del mare (Aminti et al., 2003). Le dighe costiere rappresentano in questo senso una possibile strategia di mitigazione del rischio da Risalita Relativa del Livello del Mare (RSLR).

Le dighe costiere e le sezioni tipo

Le dighe costiere sono molto diffuse lungo le coste del Mare del Nord (Paesi Bassi, Germania, Gran Bretagna, Danimarca e Belgio) e in alcune zone degli Stati Uniti, dove però il rischio di inondazione è più dovuto a tifoni e uragani che non a semplici tempeste da vento.

Normalmente, a differenza degli dighe fluviali, ma analogamente alle dune, le dighe costiere non sono sollecitate lato mare da un battente d'acqua stazionario. Sia lato mare (Fig. 2a), sia lato terra (Fig. 2b) si presentano in caso di mare calmo come un rilevato in terra completamente coperto di vegetazione.

Diverse tipologie di dighe costiere si sono affermate negli anni, sostanzialmente in relazione alla reperibilità dei materiali. Due sono le tipologie più diffuse:

- (1) Corpo diga in materiale incoerente, rivestimento in materiale coesivo con una copertura protettiva erbosa (Fig. 3a);
- (2) Corpo diga in materiale coesivo con una copertura protettiva erbosa (Fig. 3b).

Il primo tipo è largamente diffuso nei Paesi Bassi e in Germania, il secondo in Gran Bretagna.



Figura 2 - Tipico aspetto di dighe costiere lungo le coste del Mare del Nord (Paesi Bassi): a) a sinistra, diga costiera da TAW (1996); b) a destra, lato terra di diga costiera a Marken (2004).

Gli argini di difesa a mare e gli esempi in Italia

Nel Mediterraneo sono rari gli esempi di realizzazione di dighe costiere poiché l'escursione mareale e i sovralti da vento e gradiente barometrico sono complessivamente bassi, e le aree al di sotto del livello del mare sono molto circoscritte e limitate. In Italia le massime variazioni del livello medio del mare rispetto al livello di mare calmo raggiungono valori di 1 m solamente nell'alto Adriatico dove si trovano anche aree costiere a quote molto basse. Inoltre per motivi paesaggistici, turistici, economici e di urbanizzazione, si preferisce mantenere la spiaggia, anche se protetta da opere in mare o ricostruita artificialmente mediante ripascimenti e limitare l'uso di strutture di difesa rigide che interrompono la continuità tra l'entroterra e la spiaggia.

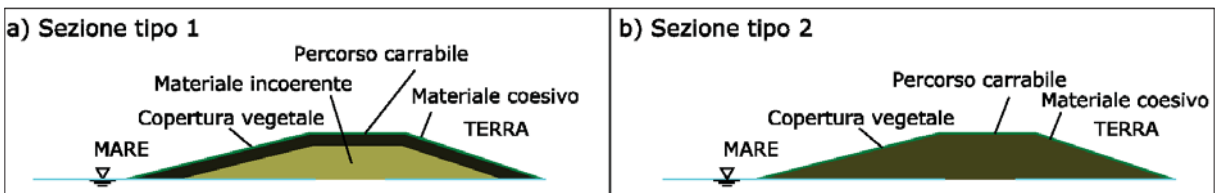


Figura 3 - Sezioni tipo di dighe costiere.

In Italia gli argini di difesa a mare sono pochi e presentano alcune differenze rispetto alle dighe costiere. Due esempi si trovano in prossimità dei Lidi Ferraresi e del delta del Fiume Po, dove le quote del terreno sono basse e si registra una tendenza alla subsidenza (ARPA, 2002).

Il primo esempio è l'argine che protegge l'abitato di Goro e la campagna circostante, nei pressi del delta del Fiume Po (*argine perimetrale della Sacca di Goro*). L'area è caratterizzata da quote al di sotto del livello medio del mare che raggiungono valori di -2 m e determinano un'ampia area allagabile. L'argine individua il limite perimetrale a terra della Sacca di Goro, si estende per circa 10 km ed è costituito da più tronchi con caratteristiche leggermente diverse. Ciascun tronco è formato da un corpo di materiale di riempimento, una protezione in massi naturali lato mare (Fig. 4a), una copertura erbosa lato terra (Fig. 4b) e una sovrastruttura stradale sterrata ma carrabile pedonale sul coronamento (Fig. 4a).

Il secondo esempio è l'argine che protegge la pineta di Volano, tra Lido di Volano e Lido delle Nazioni, i primi due Lidi ferraresi procedendo da Nord verso Sud (*argine scogliera di Bocche del Bianco e Pineta di Volano*).



Figura 4 - Argini di difesa a mare in Italia: argine perimetrale della Sacca di Goro (2004). a) a sinistra, lato mare; b) a destra, lato terra.

In questo caso, la struttura difende direttamente dall'ingressione del mare, ma l'immediato entroterra è caratterizzato da quote generalmente al di sopra del livello medio del mare, anche se molto basse.

L'argine si estende per circa 3 km ed è costituito da un corpo di materiale di riempimento rivestito con uno strato di geotessuto lato mare e sul coronamento, un'ulteriore protezione in massi naturali lato mare (Fig. 5a), una copertura erbosa lato terra, non sempre in buone condizioni vegetative (Fig. 5b) e un coronamento carrabile pedonale.



Figura 5 - Argini di difesa a mare in Italia: argine scogliera di Bocche del Bianco e Pineta di Volano (2004). a) a sinistra, lato mare; b) a destra, lato terra.

Il sistema di difesa della costa nei pressi di Lido di Volano è completato da un secondo argine (*argine Acciaioli Lido di Volano - Porto Garibaldi*), lungo circa 16 km, arretrato nell'entroterra rispetto al primo, che rappresenta una difesa aggiuntiva nel caso il mare riesca ad oltrepassare la prima linea di difesa. La struttura, oltre a rappresentare una seconda linea di difesa, svolge la funzione di rilevato stradale, alloggiando sul coronamento la Strada Panoramica Acciaioli.

Da un punto di vista puramente terminologico e di definizione, in Italia, gli argini di difesa a mare sono strutture che svolgono la stessa funzione delle dighe costiere, su cui gravano gli stessi carichi, ma con una sezione tipo intermedia tra scogliere radenti e dighe costiere. La progettazione degli argini di difesa a mare è da considerarsi pertanto autonomamente rispetto alle scogliere radenti e presenta molte analogie con quella delle dighe costiere.

Definizione di criteri e strumenti di progettazione

L'approccio più corretto per la progettazione di tutte le strutture di difesa della costa è basato sulla probabilità di rottura della struttura e sul calcolo del rischio ad essa associato. Il rischio (R), misurato in €/anno è tipicamente definito come il prodotto della probabilità di rottura in un fissato intervallo di tempo (p_f) e il danno economico ad essa associato (D):

$$(1)$$

La probabilità di rottura della struttura (p_f) è data dalla combinazione delle probabilità di accadimento di tutti i possibili meccanismi di rottura o stati limite. Un possibile strumento per l'analisi degli stati limite di una struttura è l'albero dei guasti o *fault tree* (Burcharth, 1994).

L'albero dei guasti degli argini di difesa a mare

Alberi del danno sono stati proposti per la maggior parte delle strutture di difesa della costa, ma non sono sempre applicati nella pratica progettuale e, in alcuni casi, restano oggetto di ricerca per la comunità internazionale, perché mancano conoscenze esaustive sulla fisica dei meccanismi di rottura e sulle correlazioni tra di essi, e i modelli interpretativi che si traducono in stati limite non sono adeguatamente affidabili. Recentemente è stato elaborato un albero dei guasti per dighe costiere (Kortenhaus e Oumeraci, 2002), che può essere usato come riferimento anche per gli argini di difesa a mare. Un possibile albero dei guasti per gli argini, derivato da quello per dighe costiere di Kortenhaus e Oumeraci (2002), è proposto in questo studio come base di partenza per approfondire la conoscenza del comportamento degli argini e per la loro progettazione (Fig. 6).

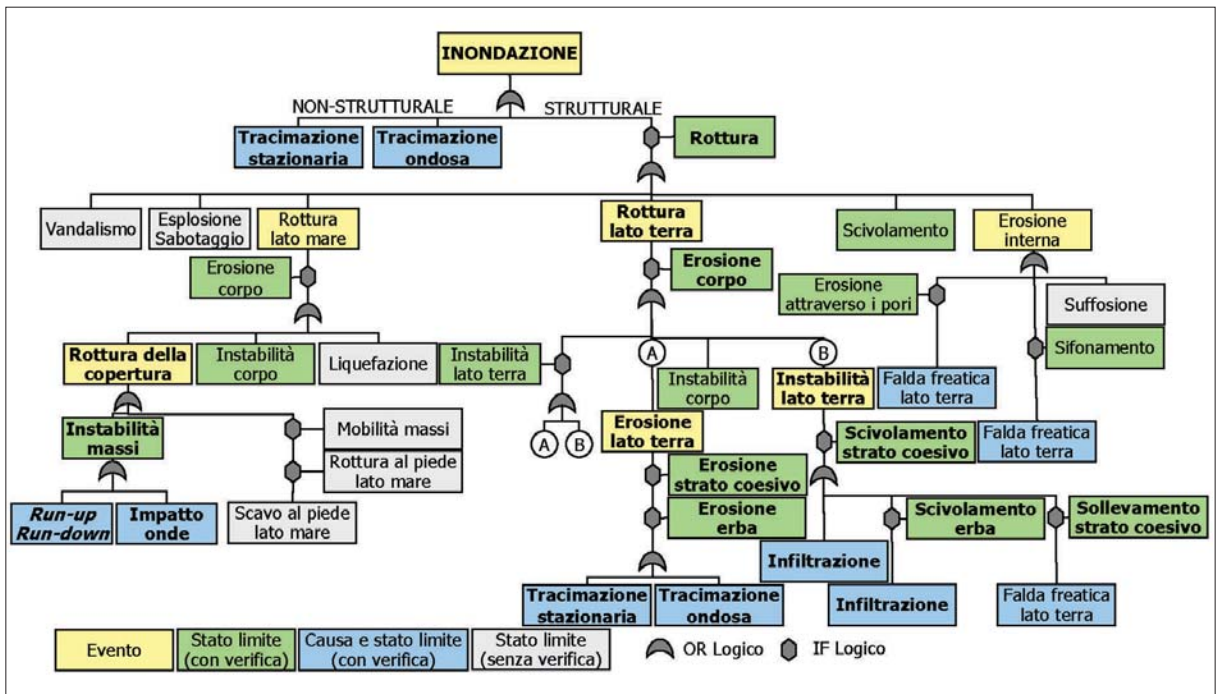


Figura 6 - Albero dei guasti per argini di difesa a mare derivato da Kortenhaus e Oumeraci (2002).

L'albero dei guasti degli argini di difesa a mare ha una struttura semplificata rispetto a quello per le dighe costiere, data la minore severità delle sollecitazioni e la diversa sezione tipo. I meccanismi di rottura si dividono principalmente in tre categorie sulla base dell'inizio della rottura: (i) stati limite con conseguente danno e rottura lato terra, (ii) stati limite con conseguente danno e rottura lato mare, (iii) stati limite di erosione interna con conseguente collasso globale della struttura. Gli stati limite in grassetto (Fig. 6) saranno più dettagliatamente discussi e applicati al caso di studio.

Cause e meccanismi di rottura principali

Sia per le dighe costiere, sia per gli argini di difesa a mare, se esiste un danno iniziale alla struttura per effetto di una precedente mareggiata, l'inizio della rottura si concentra intorno alla zona danneggiata dove la resistenza dei materiali è minore di quella nominale di progetto. In assenza di un danno iniziale, l'inizio della rottura di un argine di difesa a mare dipende principalmente dal battente d'acqua e dalla sezione della struttura (Fig. 7):

(1) Lato mare: (i) onde frangenti o che risalgono sulla struttura *-run-up e run-down-* (Fig. 7a) per la presenza di un ridotto battente d'acqua e (ii) infiltrazione (Fig. 7d);

(2) Lato terra: (i) elevate portate di tracimazione ondosa, stazionaria o combinata (Fig. 7b,c), per la presenza di un elevato battente d'acqua e (ii) infiltrazione (Fig. 7d).

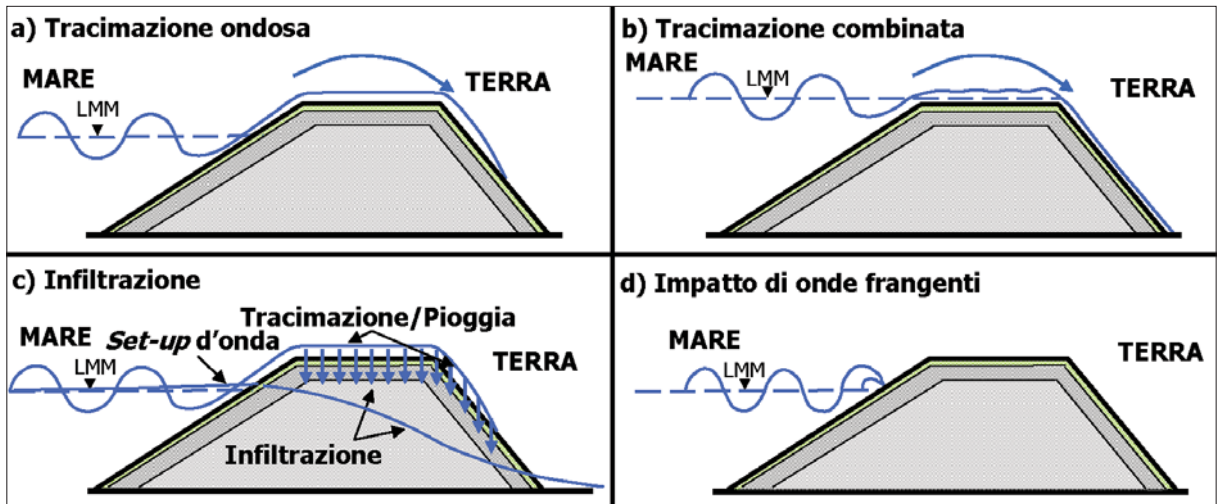


Figura 7 - Principali cause di inizio rottura dell'argine.

Sia l'analisi dell'albero dei guasti di dighe costiere, sia statistiche su casi di rotture avvenute durante catastrofici eventi di inondazione (Paesi Bassi, 1953 e Germania, 1962) hanno mostrato che per le dighe costiere la rottura ha più frequentemente inizio lato terra indotta da tracimazione ondosa, per (i) erosione della protezione erbosa, (ii) erosione del rivestimento in materiale coesivo, (iii) scivolamento della protezione erbosa, (iv) instabilità del rivestimento (scivolamento o sollevamento) e (v) macroinstabilità (instabilità di parte del corpo della struttura o scivolamento). Anche la rottura lato mare indotta dall'impatto delle onde, per (i) erosione della copertura protettiva erbosa e (ii) del rivestimento in materiale coesivo, ha probabilità di accadimento non trascurabili, soprattutto se la diga, a seguito di precedenti danni, è stata innalzata e l'inclinazione del paramento lato terra è stata ridotta.

Nel caso degli argini di difesa a mare non esistono studi specifici e casistiche documentate. In Italia, data la limitata escursione del livello medio del mare e la quota normalmente elevata del coronamento dell'argine, è possibile ipotizzare una maggiore probabilità di rottura lato mare. Questa ipotesi è parzialmente giustificata dagli effetti di una mareggiata del 1999 sull'argine scogliera di Bocche del Bianco e Pineta di Volano che ha richiesto un intervento di manutenzione di emergenza (Fig. 8a). Un sopralluogo dell'argine nel 2004 ha rilevato delle vie preferenziali di erosione lato terra (Fig. 8b), ma non si sono mai registrati danni gravi alla struttura che richiedessero con urgenza alcun intervento.

Lo stato dell'arte nella previsione degli stati limite

La rottura di dighe costiere è un fenomeno complesso, puramente tridimensionale ed è il risultato di una serie di meccanismi erosivi e di instabilità (stati limite) che si susseguono a cascata (Fig. 6).

Alcuni meccanismi non sono stati ancora completamente chiariti dal punto di vista fisico e non esistono modelli interpretativi sufficientemente affidabili. Inoltre la maggior parte delle indagini sperimentali e dei

modelli disponibili si riferiscono a dighe fluviali, che normalmente hanno dimensioni inferiori alle dighe costiere, sezioni tipo diverse, anche se di materiali simili, e sono sollecitate da tracimazione stazionaria e non da tracimazione ondosa impulsiva e non stazionaria.

La previsione della rottura delle dighe costiere, sia lato terra sia lato mare, si è comunemente limitata all'applicazione di criteri di tipo empirico che indicano l'inizio del processo di danneggiamento (TAW, 1997). La rottura è arbitrariamente assunta all'inizio della mareggiata o se la copertura protettiva erbosa è danneggiata:

- (1) Lato mare: il tempo necessario per rimuovere la protezione vegetale nella zona dei frangenti a causa dell'impatto delle onde è calcolato in funzione dell'altezza d'onda significativa al piede della struttura, dello spessore della copertura protettiva erbosa, di un coefficiente di sicurezza e di un coefficiente di erosione dell'erba;
- (2) Lato terra: la protezione vegetale è danneggiata se la portata di tracimazione supera un valore ammissibile, in genere dell'ordine di 10 l/sm in caso di copertura erbosa in condizioni da medie a buone.



Figura 8 - Danneggiamento dell'argine scogliera di Bocche del Bianco e Pineta di Volano: a) a sinistra, lato mare (da Regione Emilia-Romagna, 1999); b) a destra, lato terra (2004).

Anche altri stati limite sono normalmente verificati con semplici formule di derivazione empirica, spesso fissando valori critici della velocità dell'acqua o del tempo durante il quale la sollecitazione grava sulla struttura (Kortenhaus, 2003). Per alcuni stati limite, non esiste ancora un modello interpretativo semplice ed affidabile che ne verifichi l'occorrenza (erosione interna, suffosione, scavo al piede lato mare, rottura al piede lato mare, mobilità massi di protezione). E' dunque necessario sviluppare modelli fisicamente basati che riproducano il fenomeno dall'inizio della mareggiata alla completa rottura. Recentemente è stato proposto un modello per la rottura delle dighe costiere lato terra (D'Eliso, 2007) ed è stato presentato anche un modello per la rottura lato mare (Stanczak et al., 2006). Il modello per la rottura lato terra può essere applicato anche agli argini di difesa a mare. Il modello per la rottura lato mare può essere applicato agli argini solo per le fasi successive alla rimozione della protezione costituita da massi naturali invece che dalla copertura protettiva erbosa e del rivestimento coesivo. In entrambi i casi, data la diffusione ancora puramente accademica dei due modelli, occorre verificare che anche le usuali relazioni empiriche siano soddisfatte. L'instabilità e la rimozione dei massi naturali possono essere valutate con le formule di stabilità per scogliere radenti in massi.

Un nuovo modello per la rottura di dighe costiere indotta da tracimazione ondosa

Il modello proposto, sviluppato per la rottura di dighe costiere indotta da tracimazione, ma estendibile anche ad argini di difesa a mare, è stato sviluppato in collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze e il Leichtweiß Institut für Wasserbau dell'Università Tecnica di Braunschweig (Germania) ed è stato l'oggetto della tesi di dottorato di uno dei due autori (D'Eliso, 2007).

Sulla base di un'estensiva analisi della letteratura disponibile, il processo di rottura è stato schematicamente articolato in sei fasi (Fig. 9), all'interno delle quali sono stati individuati otto meccanismi di rottura principali (Fig. 10).

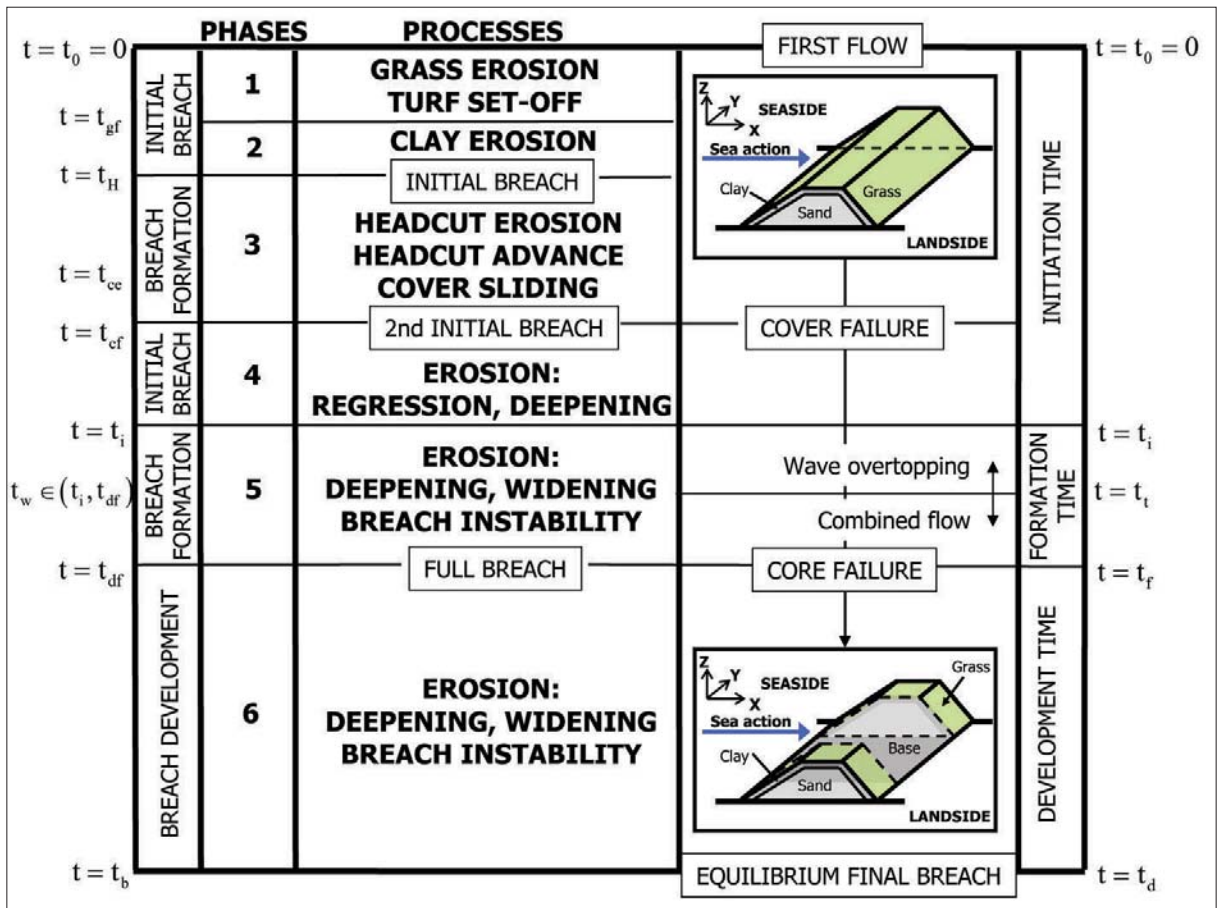


Figura 9 - La rottura di dighe costiere per tracimazione ondosa.

La sezione tipo della diga è formata da un corpo in materiale incoerente, un rivestimento in materiale coesivo e una copertura protettiva erbosa. Il modello riproduce il comportamento della struttura dall'inizio della mareggiata, quando inizia la tracimazione, alla completa rottura con conseguente formazione di un canale attraverso la diga che si allarga fino ad assumere una configurazione di equilibrio che corrisponde alla completa inondazione della zona protetta e a un livello medio del mare uguale alla profondità dell'acqua nell'area allagata (Fig. 9).

Approccio metodologico

Il modello è stato sviluppato su due livelli, definendo un sistema di modellazione modulare e progressivo (Fig. 11):

- (1) Livello I (modello preliminare): principalmente basato su equazioni empiriche e analitiche, anche se fisicamente basate, e ipotesi semplificative;
- (2) Livello II (modello dettagliato): include tutti i meccanismi di erosione e instabilità che determinano la rottura della diga, rimuove alcune ipotesi semplificative e rappresenta un primo passo verso una previsione completa e fisicamente basata del fenomeno.

COPERTURA PROTETTIVA ERBOSA

a) Erosione della copertura erbosa, Sacca di Goro, Italy (2004). b) Instabilità della copertura erbosa, Grothusenkoog (1976)*.



RIVESTIMENTO IN MATERIALE COESIVO

c) Erosione del materiale coesivo, GWK (2002). d) Instabilità del materiale coesivo, GWK (2002). e) Erosione materiale coesivo/incoerente, LWI (2005). f) Instabilità del rivestimento coesivo, Augustenbroden Ostseite Jadebusen (1962)**.



CORPO IN MATERIALE INCOERENTE

g) Erosione del materiale incoerente, LWI (2005). h) Intabilità del materiale incoerente, LWI (2005).



Figura 10 - Principali meccanismi nella rottura di dighe costiere per tracimazione ondosa (*Archivio fotografico LWI, Germania, **Die Küste, Heft 1, 1962).

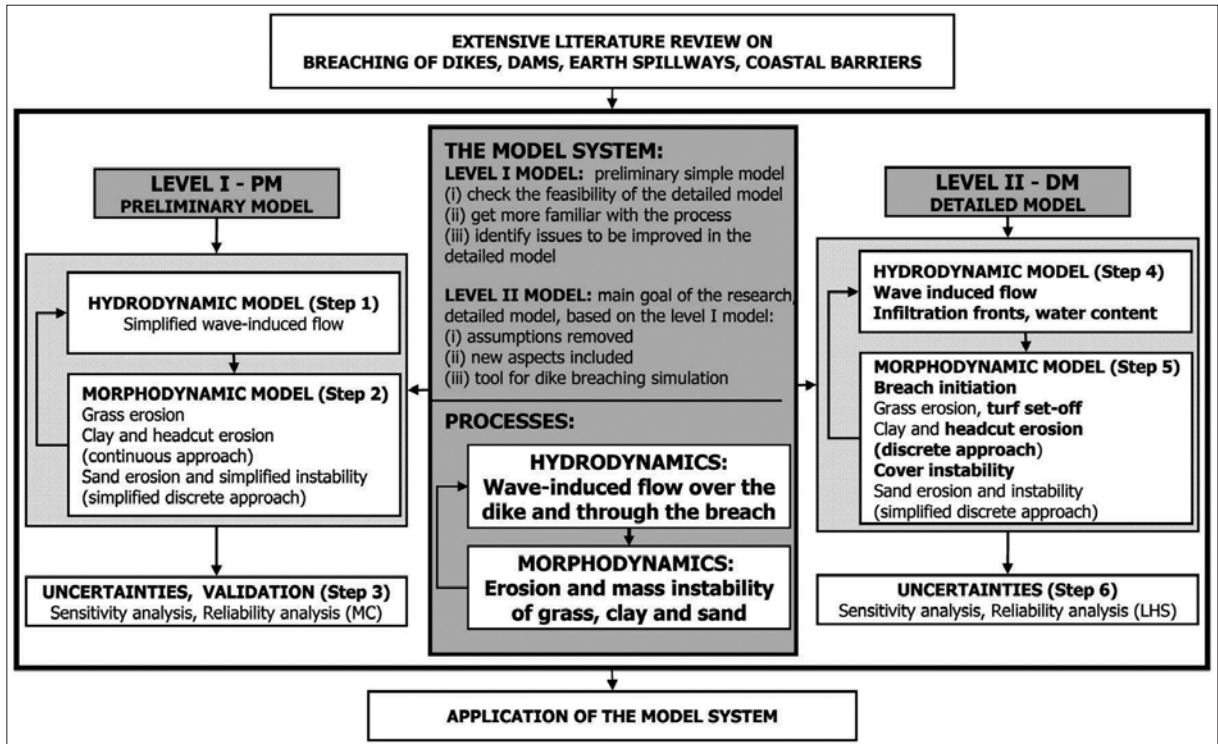


Figura 11 - Approccio metodologico del nuovo sistema di modellazione della rottura di dighe costiere indotta da tracimazione.

Formulazione matematica del modello

Ciascuno dei due modelli, preliminare e dettagliato, nasce dall'integrazione di una serie di modelli interpretativi, in molti casi modificati per adattarli al presente caso di studio, che descrivono i meccanismi di rottura della diga indotti dalla tracimazione ondosa, includendo anche i casi particolari di tracimazione stazionaria, tracimazione combinata e infiltrazione indotta da tracimazione. Entrambi i modelli, dopo aver valutato le condizioni di tracimazione e aver letto come input il modello di infiltrazione da applicare, risolvono iterativamente un modulo idrodinamico che calcola la tracimazione, il flusso nella rottura attraverso la diga e l'infiltrazione, e un modulo morfodinamico che calcola l'erosione e verifica i meccanismi di instabilità (Fig. 11). In Tab. 1 e Tab. 2, si riportano le principali caratteristiche dei modelli interpretativi utilizzati, individuando l'equazione chiave di ciascun modello e rimandando alle pubblicazioni specifiche e alla documentazione completa del sistema di modellazione per maggiori dettagli (D'Eliso et al., 2007).

Risultati e limiti del modello

I principali risultati ottenibili dai due modelli sono il tempo associato a ciascuna delle sei fasi (Fig. 9), la larghezza del canale di rottura e l'idrogramma della portata di tracimazione e attraverso la rottura. I due modelli sono stati validati con alcuni dati sperimentali disponibili e con casi di reale rottura di dighe. I risultati ottenuti sono soddisfacenti e l'accuratezza del modello dettagliato è risultata maggiore di quello preliminare che fornisce risultati cautelativi a favore di sicurezza (D'Eliso et al. 2007). Tuttavia una completa validazione è ancora mancante perché non esistono dati sperimentali a grande scala che riproducano interamente il fenomeno. Sono previsti per la fine del 2007, all'interno del progetto FLOODsite (2004-2009) esperimenti in grande scala nel GWK di Hannover, Germania (Gaisenheiner e Kortenhau, 2007). Le analisi di sensitività e di affidabilità (simulazioni Monte Carlo), hanno mostrato una forte dipendenza dei risultati del modello dai dati in ingresso, specialmente le proprietà dell'erba e del materiale coesivo (D'Eliso, 2007), che per loro natura sono ampiamente incerte e variano stocasticamente lungo il profilo della struttura.

Il principale contributo offerto dal nuovo sistema di modellazione è l'aver integrato ed incluso tutti i model-

li interpretativi disponibili per descrivere un fenomeno complesso, per il quale fino ad adesso non esisteva alcun modello (Tab. 3). Il nuovo sistema di modellazione rappresenta inoltre uno strumento ingegneristico per la progettazione delle dighe in fase di progetto preliminare (Livello I) e di progetto definitivo/esecutivo (Livello II). Inoltre, essendo basato su un approccio modulare (Fig. 11), ciascun modulo può essere migliorato per ottenere una capacità di simulazione della rottura sempre maggiore.

Tabella 1 - Formulazione matematica del nuovo modello: modulo idrodinamico.

MECCANISMO	MODELLO
Tracimazione ondosa Modello preliminare Schüttrumpf e Oumeraci (2005)	<p>Flusso di tracimazione lato terra (h_t, v_t): $s \in [0, H_d \sin \beta]$</p> $v_t(s) = \frac{v_c(B_d) + \frac{k_1(s)h_1(s)}{f} \tanh\left(\frac{k_1(s)t}{2}\right)}{1 + \frac{fv_c(B_d)}{h_1(s)k_1(s)} \tanh\left(\frac{k_1(s)t}{2}\right)}; \quad h_1(s) = \frac{v_c(B_d)h_c(B_d)}{v_t(s)}$ $t \approx -\frac{v_c(B_d)}{g \sin \beta} + \sqrt{\frac{v_t(s)^2}{g^2 \sin^2 \beta} + \frac{2s}{g \sin \beta}}; \quad k_1 = \sqrt{\frac{2fg \sin \beta}{h_1(s)}}$ <p>Portata di tracimazione: $q = h_t v_t$</p>
Tracimazione ondosa Modello dettagliato Liu e Lin (1997)	<p>Equazioni Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS):</p> <p>- Equazione di continuità: $\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad j = 1, 2, 3$</p> <p>- Equazione del momento di quantità di moto:</p> $\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_j} \quad j = 1, 2, 3$ <p>Funzione VOF (F) per la superficie libera:</p> $\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i F) + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j F) = 0 \quad \text{con densità di cella } \rho(x, z, t) = F(x, z, t) \rho_w$
Tracimazione combinata Modello preliminare e dettagliato Bleck et al. (2000)	<p>Portata di tracimazione (q_{Comb}):</p> $q_{Comb} = \frac{2}{3} \mu_{Comb} (\sqrt{2g}) h_{Comb}^{1.5}$ <p>Portata attraverso la rottura ($Q_{b,Comb}$):</p> $Q_{b,Comb} = \frac{2}{3} \mu_{Comb} (\sqrt{2g}) B_b h_{Comb}^{1.5}$ <p>Coefficiente di portata: $\mu_{Comb} = 0.4728 \xi_d$</p>
Tracimazione stazionaria Modello preliminare e dettagliato	<p>a) Equazione di continuità:</p> <p>(i) Portata di tracimazione (q): $q = hv$</p> <p>(ii) Portata attraverso la rottura (Q_b): $Q_b = B_b hv = \text{const}$</p> <p>b) Energia totale (H):</p> $\frac{dH}{dx} = -J; \quad H = z + h + \frac{v^2}{2g}; \quad J \text{ gradiente di energia}$
Infiltrazione Modello dettagliato Weissmann (2003)	<p>Fronte d'acqua saturo (z_s) su profondità d'acqua media ($\bar{h}(t)$):</p> $t = \frac{\theta_s - \theta_i}{k_s} \left(\Delta \Psi_m + \bar{h}(t) + z_s(t) \right) \ln \left(\frac{\Delta \Psi_m + \bar{h}(t)}{\Delta \Psi_m + \bar{h}(t) + z_s(t)} \right)$ $\Delta \Psi_m \approx \frac{1}{14} \Psi(\theta_i) $
Infiltrazione Modello dettagliato Wang (2000)	<p>Fronte d'acqua saturo (z_s):</p> $z_s(t) = \sqrt{2\alpha k_s \int_0^t h(t) dt}$ <p>$\alpha = 4.5$ coefficiente empirico</p>
Infiltrazione Modello dettagliato Wang et al. (2003)	<p>Fronte d'acqua non saturo (z_w)</p> $t = \frac{\theta_s - \theta_i}{(1 + \alpha) k_s} \left(z_w - \frac{\ln(\beta z_w + 1)}{\beta} \right)$ $\alpha = \frac{N_{BC}}{2 + 3N_{BC}}; \quad \beta = \frac{2 + 3N_{BC}}{a \Psi_{BBC}}; \quad a \approx 1 \text{ coefficienti empirici}$

Tabella 2 - Formulazione matematica del nuovo modello: modulo morfodinamico.

MECCANISMO	MODELLO
Posizione inizio della rottura Modello preliminare	Estrazione casuale lungo il profilo di una sezione della diga lato terra con fattore di copertura erbosa più basso
Posizione inizio della rottura Modello dettagliato	Scenario iniziale includendo vari possibili danni iniziali a cui si assegnano specifici valori delle proprietà dei materiali
Erosione erba (Fig. 10a) Modello preliminare e dettagliato Temple & Hanson (1994)	Tensione tangenziale effettiva ($\tau_{0,e}$) e erosione (dz): $\tau_{0,e} = \tau_0 (1 - C_r) \left(\frac{n_e}{n_{tot}} \right)^2; \tau_0 = \rho_w g h J; \int_0^{t_{sf}} \tau_{0,e} dt = 3600(9I_p + 50); \Delta z_g = 0.9L_s$
Scivolamento erba (Fig. 10b) Modello dettagliato Weissmann (2003), Wang (2000)	Scivolamento: $FOS = \frac{F_{re}}{F_{mo}} < 1; F_{re} = F_{re}(c_g + c_c)$
Erosione localizzata coesivo (Fig. 10c) Modello preliminare e dettagliato Temple & Hanson (1994)	Tensione tangenziale effettiva ($\tau_{0,e}$) e erosione (dz): $\tau_{0,e} = \rho_w g (h + dz_{(t-dt)}) J; \frac{dz}{dt} = k_d (\tau_{0,e} - \tau_{0,cr})^a; a \approx 1$
Erosione coesivo -headcut- (Fig. 10c,d) Modello preliminare Temple & Moore (1997)	Tensione tangenziale effettiva $\tau_{0,e}$ (Fig. 10c): $\tau_{0,e1} = \rho_w g h J; \tau_{0,e2} = 0.011 \rho_w g h \left(\frac{H_{H1}}{H_{H,0}} \right)^{0.582}; \tau_{0,e} = \max(\tau_{0,e1}, \tau_{0,e2})$ Erosione (Fig. 10c): $\frac{dz}{dt} = k_d (\tau_{0,e} - \tau_{0,cr})^a; a \approx 1$ Instabilità (Fig. 10d): $dX = \begin{cases} \frac{1}{3600} C(A - A_0) dt & A - A_0 > 0 \\ 0 & A - A_0 \leq 0 \end{cases}$ $A = (qH_H)^{1/3}; A = A(K_b); C = C(K_b)$
Erosione coesivo (Fig. 10c,d) Modello dettagliato Stein et al. (1993) Hassan (2002), Zhu (2006)	Tensione tangenziale effettiva $\tau_{0,e}$ (Fig. 10c): $\tau_{0,e1} = C \rho_w V_0^2; J_{jet} \leq J_{jet,P}; \tau_{0,e2} = C_d^2 C \rho_w V_0^2 \frac{h_0}{J_{jet}}; J_{jet} > J_{jet,P}; J_{jet,P} = C_d^2 h_0$ Erosione dz (Fig. 10c): $\frac{dz}{dt} = k_d (\tau_{0,e} - \tau_{0,cr})^a; a \approx 1$ Instabilità (Fig. 10d): Scivolamento: $FOS = \frac{F_{re}}{F_{mo}} < 1$ Bending: $FOS = \frac{\sigma_c}{\sigma} < 1$ Ribaltamento: $FOS = \frac{M_{re}}{M_{mo}} < 1$
Erosione coesivo/incoerente (Fig. 10e) Modello dettagliato Jia et al. (2001), Jia et al. (2002)	Continuità dei sedimenti: $dz(i) = \frac{A_1 A_2}{A_3} (V_p(i) - V_d(i)) \frac{dt}{dx}$ $A_1 = 1; A_2 = \frac{\pi}{4}; A_3 = \frac{\pi}{6}$
Instabilità coesivo (Fig. 10f) Modello dettagliato Weissmann (2003), Wang (2000)	Scivolamento e sollevamento: $FOS = \frac{F_{re}}{F_{mo}} < 1$
Erosione incoerente (Fig. 10g,h) Modello preliminare e dettagliato Hassan (2002)	Continuità dei sedimenti (Fig. 10g): $\frac{\partial Q_{sT}}{\partial x} + (1 - p_s) \frac{\partial A_b}{\partial t} = 0$ Rapporto erosione verticale/laterale (Fig. 10g): $c_{db/dz,b} = \frac{db/dt}{dz/dt} \approx 1$ Instabilità -scivolamento-(Fig. 10h): $FOS = \frac{F_{re}}{F_{mo}} < 1$

Tabella 3 - Meccanismi inclusi nel nuovo sistema di modellazione e principali risultati.

MECCANISMO	AM	PM	DM	RISULTATI
Tracimazione ondosa Causa principale di rottura	N	Y*	Y*	Sia modello semplice che fisicamente basato della tracimazione e del flusso attraverso la rottura
Tracimazione combinata Causa principale di rottura Determinante per l'erosione	N	Y*	Y*	Modello idrodinamico semplice, mediato sull'onda, di moto non uniforme stazionario per la tracimazione e il flusso attraverso la rottura
Tracimazione stazionaria Determinante per l'erosione	Y	Y	Y	Modello idrodinamico di moto non uniforme stazionario per la tracimazione e il flusso attraverso la rottura
Infiltrazione Causa principale di rottura	N	N	Y*	Semplici modelli di infiltrazione per suolo saturo e non saturo
Posizione inizio della rottura Stima del tempo di allarme (t_w)	N	N	Y*	Posizione di inizio rottura casuale e approccio basato su uno scenario iniziale
Erosione dell'erba Graduale collasso	N	Y*	Y*	Approccio basato sull'eccesso di tensione tangenziale con esplicito effetto dell'erba
Scivolamento dell'erba Instabilità	N	N	Y*	Approccio basato sull'equilibrio limite delle forze senza graduale scivolamento
Erosione localizzata del coesivo Graduale collasso	Y	Y	Y	Approccio basato sull'eccesso di tensione tangenziale
Erosione del coesivo (<i>head-cut</i>) Graduale collasso	Y	Y	Y	Approccio basato sull'eccesso di tensione tangenziale e modelli di instabilità continuo e discreto
Erosione coesivo e incoerente Graduale formazione del canale di rottura iniziale	N	N	Y*	Trasporto solido in condizioni di transizione e modello di instabilità discreto
Scivolamento e sollevamento del coesivo Instabilità	N	N	Y*	Approccio basato sull'equilibrio limite delle forze
Erosione dell'incoerente Rottura completa della diga	Y	Y	Y	Trasporto solido in condizioni di equilibrio e semplice modello morfodinamico discreto
AM - Modelli di rottura esistenti, PM - Modello preliminare, DM - Modello dettagliato Y - Incluso, N - Trascurato * Meccanismo trascurato nei modelli esistenti, ma incluso nel nuovo sistema di modellazione				

Gli argini di difesa a mare come soluzione per le foci fluviali

Quasi tutte le foci dei fiumi italiani (Tevere in Lazio, Arno e Ombrone in Toscana, Trigno in Molise, Volturno in Campania) sono in erosione a causa del ridotto apporto di sedimenti e l'asta fluviale è per lunghi tratti soggetta all'ingressione di acqua salata. Alcune di queste foci sono inserite in aree naturali protette. La fruizione a fini turistici non è in questo caso rivolto alla balneazione e alla presenza di un'ampia spiaggia, ma alla conservazione dei percorsi naturali all'interno del parco. Gli argini di difesa a mare rappresentano in questo caso una possibile soluzione di difesa dall'erosione perché fissano una linea di confine tra terra e mare che impedisce il danneggiamento della riserva naturale, anche in assenza di spiaggia antistante. Nel caso in cui la spiaggia sia presente, l'argine non svolge alcuna funzione protettiva su di essa e la tendenza naturale all'erosione risulta inalterata fino al raggiungimento del piede della struttura.

La foce del Fiume Ombrone nella Maremma toscana, inserita all'interno del Parco della Maremma, è un caso applicativo particolarmente significativo, perché soggetta a tassi di erosione molto elevati.

La foce del Fiume Ombrone: tendenze erosive e problematiche

La foce del Fiume Ombrone, fra Marina di Alberese e circa 2000 m a sud di Principina a Mare, è caratterizzato da un costante processo erosivo documentato dalla cartografia relativa osizione della linea di riva negli anni 1954, 1973, 1979 e 1984/85 (Regione Toscana, 1989) e dai dati acquisiti in tempi più recenti con specifici rilievi (Fig. 12). I processi erosivi sono assai intensi in prossimità della foce tanto che la parte apicale del delta è arretrata di circa 1300 m rispetto al massimo avanzamento documentato da vecchie carte storiche verso la fine del 1800.

L'erosione è iniziata all'apice del delta, si è progressivamente estesa alle spiagge laterali e coinvolge oggi un fronte di circa 3000 m verso nord e 3400 m verso sud. La perdita complessiva di superficie della spiaggia a causa dell'erosione nel periodo 1954-2006 è stata stimata attorno a 1200000 m² ed è solo parzialmente compensata dall'espansione delle spiagge più lontane dalla foce sia a nord fra Principina a Mare e Marina di Grosseto che a sud fra Marina di Alberese e Collelungo, per complessivi 400000 m². Inoltre, contrariamente a quanto era da attendersi, dato il progressivo arretramento dell'apice del delta, il tasso erosivo non è andato a ridursi, ma si è sempre mantenuto fra i 5 ed i 10 m/anno ed anche negli ultimi anni, dal 1998 al 2006, gli arretramenti sono stati dell'ordine di 5 m/anno con massimi di circa 10 m/anno in corrispondenza della foce (Pranzini, 2006).

Come dimostrato in Aminti e Pranzini (1990), la variazione della morfologia della foce ha modificato il regime di trasporto litoraneo e potenzialmente anche la tendenza all'erosione.

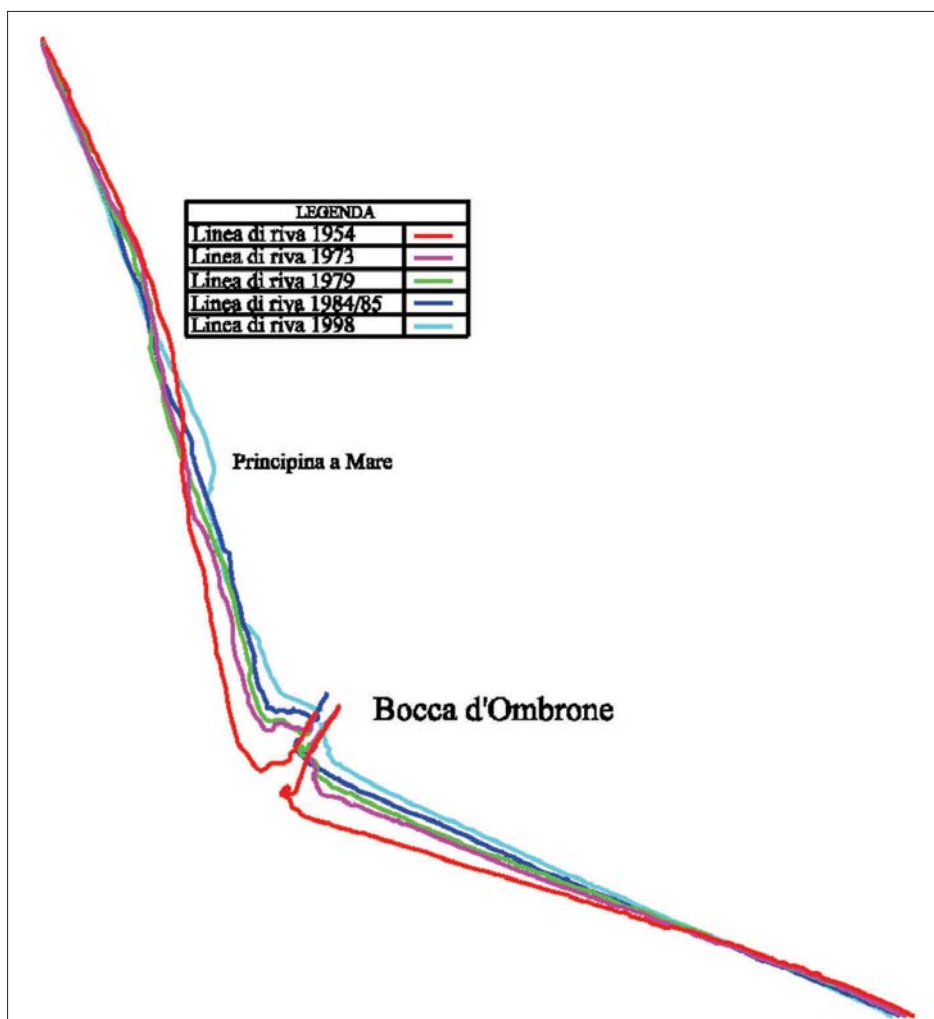


Figura 12 - Evoluzione della linea di riva nei pressi della foce del Fiume Ombrone.

Per avere un'idea della futura evoluzione della foce, è stato recentemente presentato uno studio per stimare il trasporto litoraneo potenziale sulla base dell'attuale morfologia confermando la tendenza erosiva della foce (TEA Ambiente, 2006). Lo studio si basa sulla propagazione da largo a costa del moto ondoso (dati WWA dell'ondametro 10°30'-42°30' nel periodo 1992-2004) con un modello parabolico (Kirby, 1986) e sul calcolo del trasporto litoraneo su 38 settori di ampiezza 260 m e ortogonali alla costa, con la formula del Kamphuis (Kamphuis, 2000). I modelli utilizzati sono stati sviluppati al Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze. I valori del trasporto litoraneo potenziale netto tra due settori adiacenti, indicano una sostanziale inversione della direzione del flusso di portata solida in corrispondenza della foce: nel tratto di litorale a Nord le sabbie si muovono da Sud verso Nord, mentre nel tratto a Sud le sabbie si muovono in direzione opposta. Nei primi 600 m dalla foce, i flussi presentano forti gradienti, mentre ad una distanza dalla foce di circa 600-800 m, diventano sostanzialmente regolari, con intensità circa pari a 40000 m³/anno per il litorale a Sud e 30000 m³/anno per quello a Nord. Tale andamento del trasporto litoraneo induce a ritenere che la zona a ridosso della foce (primi 600 m) sia in condizioni di forte erosione potenziale, con tassi di arretramento annuale pari ad una media di circa 12 m/anno. La tendenza è sostanzialmente erosiva per altri 2700 m a Sud, ma con tassi di arretramento dell'ordine di 1 m/anno. Sul lato nord, si osserva un'alternanza di avanzamenti e arretramenti, con prevalenza di fenomeni erosivi per un tratto di almeno 3000 m.

La foce è attualmente interessata, in concomitanza di forti mareggiate, da inondazioni che danneggiano la vegetazione e rendono inaccessibile l'area (Fig 13).

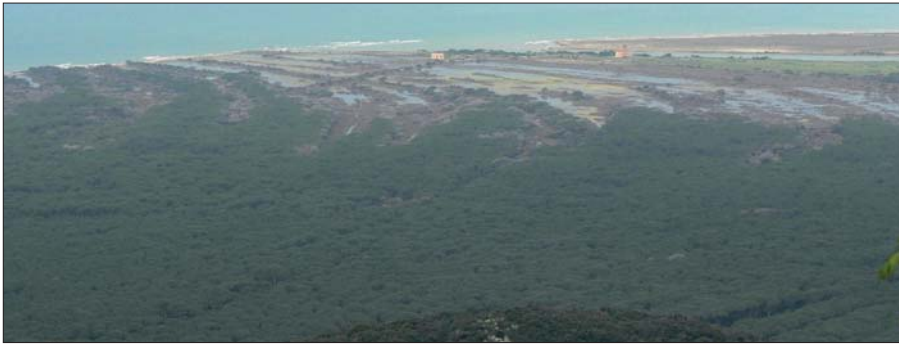


Figura 13 - Foce del Fiume Ombrone con ingressione del mare (2007).

L'argine fu costruito in terra con il paramento lato mare protetto da massi di 100-500 kg ad una distanza di 80 - 100 m dalla linea di riva. Con il progredire dei fenomeni erosivi, l'argine si è trovato sempre più vicino al mare. La frequenza e l'entità degli eventi di tracimazione ondosa è aumentata determinando l'erosione del corpo in terra fino al collasso completo della struttura. Attualmente, sono visibili lungo la linea di riva solo i massi che costituivano la protezione lato mare (Fig. 14). La limitata vita dell'argine è da imputarsi a due diversi fattori: la sottostima dei fenomeni di tracimazione e la sottostima dell'azione delle onde sul paramento lato mare.



Figura 14 - Vecchio argine di difesa della foce danneggiato per tracimazione ondosa (2006).

Il nuovo argine di difesa della foce del Fiume Ombrone

Il continuo monitoraggio dell'evoluzione della foce e studi specifici (Aminti e Pranzini, 1990; TEA Ambiente, 2006) hanno permesso un'attendibile previsione dei possibili scenari futuri. La valutazione di tali scenari suggerisce, tra le possibili forme di protezione, la costruzione di un nuovo argine arretrato verso l'entro terra di circa 150 m che verrà a trovarsi sulla linea di riva entro 15 - 20 anni. In assenza di consistenti apporti fluviali, all'arretramento della linea di riva farà seguito un approfondimento dei fondali. Una prima proposta consiste nel realizzare l'argine a Sud della foce per una lunghezza di circa 1200 m. Analoghe considerazioni sarebbero valide anche se l'argine fosse costruito lungo le spiagge a Nord. Il processo erosivo dovrebbe essere confinato dal nuovo argine e potrà evolversi solo fino al raggiungimento del piede della struttura.

Il nuovo argine sarà costruito parzialmente interrato, con una berma al piede lato mare idonea a stabilizzare il fondale che si trova a -1.3 m sotto il livello medio del mare (Fig. 15). Il corpo della struttura è previsto in materiale incoerente derivante in parte dall'argine esistente con (i) una protezione in massi naturali lato mare, composta da uno strato esterno e da un sottostrato e (ii) un rivestimento in materiale coesivo vegetato lato terra, ricavato dallo scotico del terreno circostante per lo scavo necessario all'interramento dell'argine e dalla semina di specifiche varietà erbacee. Una possibile tipologia di vegetazione per proteggere l'argine è la *Salicornia*, resistente anche a spray salmastro. Non sono tuttavia disponibili, ma sarebbero necessari, studi specifici sull'uso di tale vegetazione come protezione nei confronti dell'erosione. Il coronamento e la berma lato terra hanno accesso carrabile pedonale e ciclabile, sono percorribili solo in caso di mare calmo e possono essere realizzati con pavimentazione in betonelle permeabili o geogriglie con erba (Fig. 15).

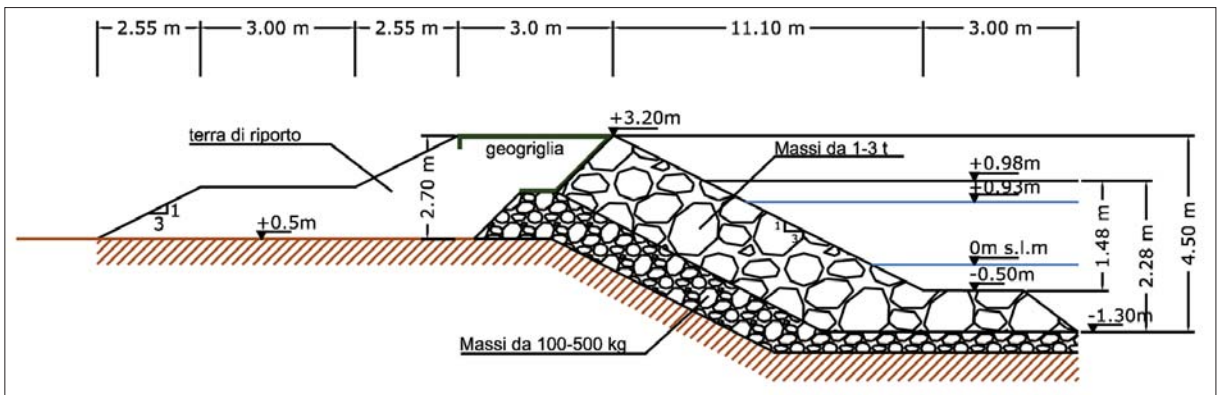


Figura 15 - Sezione tipo del nuovo argine alla foce del Fiume Ombrone.

Date le minori sollecitazioni, le dimensioni dell'argine sono ridotte rispetto a quelle tipiche delle dighe costiere presenti lungo le coste del Mare del Nord. Con l'avanzamento dell'erosione della spiaggia antistante, l'argine potrà essere sollecitato dalle onde in caso di mareggiata e alta marea. Il dimensionamento della struttura deve quindi essere tale da evitare danni sia sul paramento lato terra per tracimazione sia sul paramento lato mare per impatto diretto delle onde.

Verifiche di funzionalità e stabilità del nuovo argine

Tutte le caratteristiche geometriche, ad eccezione dell'altezza dell'argine e dei massi di protezione lato mare, sono dati di progetto, assegnati basandosi sulla pratica progettuale (Fig. 15). L'inclinazione del paramento lato terra (1:3) è generalmente debole per ridurre la possibilità di instabilità del corpo della struttura o di scivolamento e sollevamento del rivestimento coesivo. Lato mare prevale invece l'esigenza di ridurre le dimensioni della protezione in massi e l'inclinazione è maggiore (1:2), anche se questo induce portate di tracimazione più alte. La larghezza del coronamento e della berma lato terra (3 m) deve essere tale da consentire l'accesso ai mezzi per la costruzione e da svolgere la funzione di percorso pedonale e ciclabile (Fig. 15). Riconducendosi all'albero dei guasti definito per gli argini (Fig. 6) e trascurando in

questo caso alcuni degli stati limite e un'analisi probabilistica completa per la determinazione della probabilità di inondazione (p_f), si considerano solamente gli stati limite in grassetto, considerati più importanti e probabili. Per gli stati limite lato terra, che determinano l'altezza della struttura, è stato applicato il nuovo sistema di modellazione per la rottura indotta da tracimazione ondosa (D'Eliso et al., 2007), mentre lato mare si sono usate le formule universalmente accettate per la stabilità dei massi naturali di una scogliera (USACE, 2006).

Il clima meteomarinario per la verifica della struttura è stato determinato assumendo un'onda con un tempo di ritorno di 20 anni, mentre il livello medio del mare massimo tiene conto di maree, sovralzato da vento, barometrico e dovuto alle onde (Tab. 4). L'onda di progetto a largo è stata calcolata mediante analisi statistica degli eventi estremi sui dati dell'ondametro WWA di coordinate geografiche 10°30'-42°30'. Poiché il fondale al piede della struttura (h_p) è molto basso (intorno a 2 m), l'altezza d'onda significativa al piede dell'argine (H_s) si calcola verificando il criterio di frangimento imposto dal fondale, senza dover applicare modelli di propagazione di moto ondoso. Il livello medio del mare massimo ((l.m.m.)_{max}) è stato calcolato sulla base del massimo livello registrato dal mareografo di Bocca d'Arno (Livorno) negli anni 1999-2004 che non include il sovralzato indotto dalle onde. Il sovralzato indotto dalle onde è stato assunto pari al 3% dell'altezza d'onda significativa al piede della struttura (H_s). Tale valore, piuttosto limitato, tiene conto del fondale al piede dell'argine e della presenza della struttura anziché di una spiaggia naturale non protetta.

Tabella 4 - Onda e livello medio mare di progetto.

ONDA DI PROGETTO ($T_R = 20$ anni)	$H_{s,0}$ [m]	$H_s = 0.78h$ [m]	T_p [s]
		5.77	1.78
L.M.M. DI PROGETTO			
I.m.m. al piede dell'argine (sommità della berma)		I.m.m. [m]	0.50
I.m.m. al piede dell'argine (piede della berma)		I.m.m. [m]	1.30
Innalzamento del I.m.m. (marea, sovralzato da vento e barometrico)		[m]	0.93
Sovralzato d'onda		[m]	0.05
Massimo I.m.m. al piede dell'argine (sommità della berma)		$h_s = (I.m.m.)_{max}$ [m]	1.48
Massimo I.m.m. al piede dell'argine (piede della berma)		$h_p = (I.m.m.)_{max}$ [m]	2.28

Il nuovo sistema di modellazione (modello preliminare e dettagliato) è stato applicato a cinque argini di diverse altezze comprese tra 3.0 m e 5.0 m (Tab. 5). L'altezza dell'argine (H_d) è stata scelta assumendo una portata media di tracimazione ammissibile (q) compresa tra 5 e 10 l/sm e verificando che il tempo di erosione della copertura erbosa (t_{gf}) fosse intorno o superiore a circa 10 ore. La mareggiata di progetto assunta nelle verifiche ha livello medio del mare massimo ((l.m.m.)_{max}) che viene schematicamente raggiunto con crescita lineare dopo 12 ore dall'inizio della mareggiata per poi rimanere costante, e altezza d'onda significativa (H_s) costante, con i valori calcolati in Tab. 4. Si considera inoltre che la copertura erbosa si trovi in condizioni non buone, dato che le mareggiate più intense si verificano nei mesi invernali quando la vegetazione può trovarsi in pausa vegetativa. Inoltre, è opportuno cautelarsi rispetto al mancato monitoraggio e manutenzione della copertura erbosa e alla ridotta esperienza specifica italiana sull'uso di erba per la protezione dall'erosione in ambiente marino, in termini di varietà erbacee più resistenti e dei corrispondenti coefficienti di copertura (C_f). Le verifiche sono state pertanto eseguite assegnando un coefficiente di copertura erbosa (C_f) pari a 0.25.

I risultati sono fortemente cautelativi perché (i) la mareggiata reale non è caratterizzata da un livello medio del mare crescente e poi costante e un'altezza significativa costante, come in questo caso, ma prima crescenti e poi decrescenti e (ii) la copertura erbosa può trovarsi in migliori condizioni di quelle assunte. Tuttavia, anche le incertezze associate sono alte, soprattutto relativamente alle proprietà dei materiali.

Tabella 5 - Portate medie di tracimazione e tempo di erosione dell'erba per diverse altezze dell'argine.

Argine	Altezza H_d [m]	Portata media q [l/sm]	Tempo di erosione dell'erba t_{gf} [ore]	Tempo di erosione del rivestimento (erba + coesivo) t_{cf} [ore]	
				Preliminare	Dettagliato
Argine 1	3.0 (1.7 sul l.m.m.)	28	4.58	5.41	6.32
Argine 2	3.5 (2.2 sul l.m.m.)	18	6.70	7.56	8.57
Argine 3	4.0 (2.7 sul l.m.m.)	13	9.17	10.07	11.09
Argine 4	4.5 (3.2 sul l.m.m.)	10	11.68	12.62	16.15
Argine 5	5.0 (3.7 sul l.m.m.)	7	14.73	16.22	30.59

I valori ottenuti con i due modelli in Tab. 5 sono uguali poiché il modulo di erosione dell'erba non varia ed in questo caso non si verifica lo scivolamento della copertura erbosa, mentre si differenziano durante le fasi successive. Un parametro più corretto sulla base del quale definire la rottura della struttura e l'altezza necessaria a prevenirla è il tempo di erosione e rottura del rivestimento coesivo (t_{cf}). Tuttavia, date le modalità suggerite per la realizzazione dell'argine, il rivestimento coesivo non ha spessore e caratteristiche dei materiali ben definiti ed è opportuno cautelarsi rispetto a tali incertezze, assumendo come parametro decisionale la portata di tracimazione (q) da un lato e il tempo di erosione della copertura erbosa dall'altro (t_{gf}). Si indicano comunque anche i tempi di erosione e rottura del rivestimento coesivo (t_{cf}), che confermano la natura più cautelativa dei risultati del modello preliminare rispetto a quello dettagliato (Tab. 5). Da notare che se si fosse assunto come parametro di controllo il tempo di erosione e rottura del rivestimento coesivo (t_{cf}), anche un argine di altezza inferiore (Argine 3) avrebbe avuto una resistenza di circa 10 ore alla mareggiata.

Il nuovo sistema di modellazione è stato applicato all'argine che rispetta i requisiti della prima verifica (Argine 4) per diversi coefficienti di copertura erbosa (C_f), uno dei parametri maggiormente incerti e a cui il modello è particolarmente sensibile (Tab. 6).

La verifica di stabilità dei massi di protezione lato mare, effettuata con la formula di Hudson (USACE, 2006) indica uno spessore di 1.70 m di massi da 1000-3000 kg, disposti su due strati.

Tabella 6 - Tempo di erosione dell'erba e del rivestimento per diversi coefficienti di resistenza (Argine 4).

Coefficiente di copertura erbosa C_f [1]	Tempo di erosione dell'erba t_{gf} [ore]
0.10	11.17
0.20	11.47
0.30	11.83
0.40	12.32
0.50	12.92

Conclusioni

Gli argini di difesa a mare, poco diffusi lungo le coste italiane, sono una tipologia strutturale di difesa della fascia costiera ben definita e necessitano di criteri progettuali specifici che possono essere derivati da quelli delle dighe costiere. La progettazione deve essere affrontata con un approccio basato sul rischio di rottura della struttura, ovvero sul rischio di inondazione dell'entro terra. L'albero dei guasti proposto è un possibile strumento di partenza per tale tipo di progettazione. Tuttavia, lo stato attuale delle conoscenze consente di descrivere in modo affidabile solo alcuni meccanismi di rottura che compongono l'albero. Gli strumenti disponibili e in via di sviluppo, come il nuovo sistema di modellazione presentato, consentono comunque di cautelarsi rispetto al malfunzionamento della struttura, ma devono essere ulteriormente migliorati e integrati fino ad una completa e precisa stima della probabilità di inondazione. Il nuovo argine alla foce del Fiume Ombrone in Toscana, è un primo esempio di applicazione a un caso di studio di alcuni dei criteri progettuali proposti.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Regione Emilia Romagna nella persona del Dott. Maurizio Farina per i dati forniti. Si ringraziano inoltre il Prof. Hocine Oumeraci e il Dr.-Ing. Andreas Kortenhaus, del Leichtweiß Institut für Wasserbau, Università Tecnica di Braunschweig (Germania) e partner del progetto FLOODsite, per il continuo sostegno, per i fondamentali suggerimenti e per le opportunità di confronto scientifico offerte durante lo sviluppo del nuovo sistema di modellazione.

Bibliografia

- Aminti P.L., Antonioli F., Cipriani L.E., De Donatis M., Devoti S., Gabellini M., Gallerini G., Nisi F., Pranzini E., Pugliesi C., Rossi L., Silenzi S., Verrubbi V. (2003) - *La valutazione del rischio da risalita del livello marino sulla costa della Toscana settentrionale*. Studi Costieri. 6: 166 pp.
- Aminti P.L., Pranzini E. (1990) - *Variation in longshore sediment transport rates as a consequence of beach erosion in a cusped delta* - International Conference Eurocost'90, Marsiglia, 1990.
- ARPA (2002) - *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2000*. I quaderni di ARPA (Regione Emilia-Romagna), 123 pp.
- Bleck M., Oumeraci H., Schüttrumpf H. (2000) - *Combined wave overtopping and overflow of dikes and seawalls*. Proceedings XXVII International Conference Coastal Engineering. ASCE, Poster paper, Sydney, Australia.
- Burcharth H.F. (1994) - *Reliability evaluation of a structure at sea*. MAST Advanced Study Course "Probabilistic Approach to the Design of Reliable Coastal Structures", Bologna, Italy, 50 pp.
- D'Eliso C. (2007) - *Breaching of sea dikes initiated by wave overtopping. A tiered and modular modelling approach*. Ph.D. Thesis. Università degli Studi di Firenze (Italy) e Technische Universität Carolo-Wihlelmina zu Braunschweig (Germany), 142 pp.
- D'Eliso C., Ferri S., Aminti P. L. (2005) - *Low dikes against flooding along the Tuscany coasts*. MEDCOAST 2005, 7th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, Kusadasi, Turkey, 25-29 October, pp. 1103-1114.
- Gaisenheiner P., Kortenhaus A. (2007) - *Preparation of large scale experiments on dike breaching in the Large Wave Flume (GWK) of Hanover*, FLOODsite report, 26 pp.
- Hassan M.A.A.M. (2002) - *Embankment breach formation and modelling methods*. Ph.D. thesis, The Open University, HR Wallingford (UK), pp. 391.
- Jia Y., Kitamura T., Wang S.S.Y. (2001) - *Simulation of scour process in plunging pool of loose-bed material*. Journal of Hydraulic Engineering, 127(3): 219-229.
- Jia Y., Kitamura T., Wang S.Y. (2002) - *Numerical experiment on head-cut of two-layered channel bed*. Fifth International Conference on Hydroscience and Engineering. Warsaw, Poland, September 2002.
- Kamphuis J.W. (2000) - *Introduction to coastal engineering and management*. River Edge, NJ, USA: World Scientific Publishing, 472 pp.
- Kirby J.T. (1986) - *Rational approximations in the parabolic equation method for water waves*. Coastal Engineering, 10: 355-378.
- Kortenhaus A. (2003) - *Probabilistische Methoden für Nordseedeiche*. Ph.D. thesis, Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, 154 pp.
- Kortenhaus A., Oumeraci H. (2002) - *Failure modes and fault tree analysis for sea and estuary dikes*. Proceedings 28th International Conference Coastal Engineering (ICCE), ASCE, Cardiff, U.K., 2: 2386-2398.
- Liu L.F., Lin P. (1997) - *A numerical model for breaking waves: the Volume Of Fluid method*. CACR-97-02. Center For Applied Coastal Research, Newark, Delaware, 55 pp.
- Oumeraci H. (2004) - *Sustainable coastal flood defences: scientific and modelling challenges toward an integrated risk-based design concept*. Keynote lecture. Proc. First IMA Int. Conf. on Flood Risk Assessment, Bath, UK, pp. 9-24.
- Pranzini E. (2006) - *Definizione della dinamica morfologica e sedimentologica del litorale di Bocca d'Ombrone finalizzata alla progettazione di interventi di riequilibrio*. Rapporto a cura del Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, 60 pp.
- Regione Toscana - *Atti del convegno nazionale Coste toscane: studi sull'erosione, sui venti, sul moto ondoso*. Grosseto 1989.

- Schüttrumpf H., Oumeraci H. (2005) - *Layer thicknesses and velocities of wave overtopping flow at sea dikes*. Coastal Engineering, 52: 473-495.
- Stanczak G., Oumeraci H., Kortenhuis A. (2006) - *Breaching of sea dikes initiated by breaking wave impact on the seaward slope*. Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), ASCE, S. Diego, USA.
- Stein O.R., Julien P.Y., Alonso C.V. (1993) - *Mechanics of jet scour downstream of a headcut*. Journal of Hydraulic Research. 31(6): 723-737.
- TAW (1997) - *Erosion resistance of grassland as dike covering*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), Technical report, Delft, The Netherlands, 49 pp.
- TEA Ambiente (2006) - *Studio meteomarinario e valutazione del trasporto solido litoraneo alla foce del Fiume Ombrone*. Rapporto per conto dell'Ente Parco della Maremma. 40 pp.
- Temple D.M., Hanson G.J. (1994) - *Headcut development in vegetated earth spillways*. Applied Engineering in Agriculture. 10: pp. 677-682.
- Temple D.M., Moore J. (1997) - *Headcut advance prediction for earth spillways*. Transaction of the ASAE, 40(3): 557-562.
- USACE (2006) - *Coastal Engineering Manual*. Engineer Manual 1110-2-1100, US Army Corps of Engineers, Washington D.C., USA (in 6 volumes).
- Wang Q., Horton R., Shao M. (2003) - *Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution*. Soil Science, 168(10): 671-676.
- Wang Z. (2000) - *Seepage erosion and surface erosion*. Internal report ProDeich, Vorläufiger Bericht 3, Essen, Germany, 15 pp.
- Weißmann R. (2003) - *Die Widerstandsfähigkeit von Seedeichbinnenböschungen gegenüber ablaufendem Wasser*. Ph.D. thesis, Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Essen, Deutschland, 147 pp.
- Zhu Y. (2006) - *Breach growth in clay-dikes*. Ph.D. thesis, TU Delft, Delft, The Netherlands, 213 pp.

Lista dei simboli

A_b	Sezione della rottura attraverso la diga	[m ²]
B_b	Larghezza della rottura attraverso la struttura	[m]
B_d	Larghezza del coronamento	[m]
C	Coefficiente adimensionale di Chezy	[1]
c_c	Coesione del rivestimento coesivo	[N/m ²]
C_d	Coefficiente di diffusione	[1]
C_f	Coefficiente di copertura erbosa	[1]
c_g	Coesione indotta dalle radici dell'erba	[N/m ²]
D	Danno atteso	[€]
f	Coefficiente di attrito	[1]
F_{mo}	Forza destabilizzante	[N/m ²]
FOS	Coefficiente di sicurezza	[1]
F_{re}	Forza stabilizzante	[N/m ²]
g	Accelerazione di gravità	[m/s ²]
h	Profondità dell'acqua	[m]
h_0	Profondità dell'acqua nello scavo	[m]
h_c	Profondità dell'acqua sul coronamento	[m]
h_{Comb}	Battente di tracimazione combinata	[m]
H_d	Altezza della struttura	[m]
H_H	Altezza dello scavo nel rivestimento coesivo	[m]
$H_{H,0}$	Altezza iniziale dello scavo nel rivestimento coesivo	[m]
h_l	Profondità dell'acqua lato terra	[m]
H_s	Altezza d'onda significativa	[m]
$H_{s,0}$	Altezza d'onda significativa a largo	[m]
I_p	Indice di plasticità	[%]

J	Distanza sommità-fondo scavo nel rivestimento coesivo	[m]
k_d	Coefficiente di erosività	$[m^3/(N \cdot s)]$
K_h	Coefficiente di migrazione della fossa di erosione	[1]
k_s	Conducibilità idraulica a saturazione	$[m/s]$
l.m.m.	Livello medio del mare	[m]
L_s	Profondità degli steli d'erba	[m]
M_{mo}	Momento destabilizzante	$[N/m]$
M_{re}	Momento stabilizzante	$[N/m]$
N_{BC}	Indice di distribuzione della dimensione dei pori	[1]
n_c	Coefficiente di Manning del materiale coesivo	$[m^{-1/3}s]$
n_{tot}	Coefficiente di Manning di erba e materiale coesivo	$[m^{-1/3}s]$
p	Pressione del fluido	$[N/m^2]$
p_f	Probabilità di rottura	[1/s]
p_s	Porosità del materiale incoerente	[1]
q	Portata di tracimazione	$[m^3/sm]$
Q_{sT}	Portata di trasporto solido	$[m^3/s]$
R	Richio di inondazione	$[€/s]$
t_{cf}	Tempo di erosione del rivestimento coesivo	[s]
t_{gf}	Tempo di erosione della copertura protettiva erbosa	[s]
T_p	Periodo di picco	[s]
v	Velocità dell'acqua	[m]
v_0	Velocità dell'acqua nello scavo	[m]
v_c	Velocità dell'acqua sul coronamento	[m]
V_d	Volume di sedimenti depositati	$[m^3]$
v_l	Velocità dell'acqua lato terra	[m]
V_p	Volume di sedimenti erosi	$[m^3]$
α	Angolo di inclinazione lato mare	[rad]
β	Angolo di inclinazione lato terra	[rad]
Δz_g	Profondità di erosione alla rottura dell'erba	[m]
θ_i	Contenuto volumetrico d'acqua iniziale	[1]
θ_s	Contenuto volumetrico d'acqua a saturazione	[1]
ρ_w	Densità dell'acqua	$[kg/m^3]$
σ	Tensione di trazione	$[N/m^2]$
σ_c	Resistenza a trazione del materiale coesivo	$[N/m^2]$
τ	Tensione tangenziale	$[N/m^2]$
$\tau_{0,cr}$	Tensione tangenziale critica al fondo	$[N/m^2]$
ξ_d	Parametro di Iribarren	[1]
ψ	Altezza di suzione	[m]
$\psi_{b,BC}$	Altezza di suzione con ingresso di aria nei pori	[m]

Ricevuto il 22/02/2007, accettato il 29/05/2007.

Studio del trasporto sedimentario su spiagge a granulometria mista tramite traccianti fluorescenti: applicazioni a Porto Recanati (MC)

Emanuele Castiglione, Paolo Ciavola e Simone Caleffi

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara.
Via Saragat, 1 - 44100 Ferrara. Tel. +39-0532-974739, E-mail: cstmn1@unife.it

Riassunto

In questo lavoro si presentano i risultati di un esperimento per lo studio del trasporto di sabbie effettuato su una spiaggia di Porto Recanati (MC), attraverso l'utilizzo di traccianti fluorescenti, di rilievi topografici di precisione e di campionamenti granulometrici.

L'obiettivo principale di questo esperimento era quello di capire le direzioni del trasporto sedimentario su di una spiaggia sita vicino una foce fluviale, che ha la particolarità di essere di tipo "misto" da un punto di vista granulometrico, cioè costituita da sabbia e ghiaia. Tale tipologia di spiaggia è caratterizzata da una forte variabilità granulometrica con frequenti cambiamenti anche orari.

La spiaggia in questione presenta una pendenza molto elevata che permette di classificarla come "riflettente" con un gradino di battigia molto accentuato.

L'esperimento si è svolto con condizioni meteomarine di alta energia, generate da venti predominanti da S-E. Le condizioni "estreme" dell'esperimento hanno permesso di quantificare solo in parte i valori di trasporto litoraneo, poiché la velocità di deriva lungocosta è risultata molto elevata e di conseguenza si è assistito ad una rapida diluizione della massa di sedimento tracciante, diminuendo la quantità di tracciante recuperato. Si è quindi deciso di non considerare dati con percentuale di recupero del tracciante inferiore a 60%. Dallo studio dell'evoluzione morfologica e della distribuzione granulometrica si sono ricostruite le direzioni di migrazione del materiale iniettato, che si è in parte spostato lungocosta ed in parte ortogonalmente, differenziandosi in base alla granulometria. Si è notato infatti come, in condizioni di alta energia, la frazione ghiaiosa tenda a concentrarsi alla base della battigia, mentre la sabbia si distribuisce sulla parte alta della spiaggia.

Si è anche notato che nei periodi meno energetici sulla spiaggia venivano a formarsi accumuli ciottolosi che non erano presenti al momento dei campionamenti pre-esperimento. Esperimenti futuri si concentreranno sul trasporto di questa classe granulometrica.

Parole chiave: traccianti fluorescenti, Adriatico, sedimenti costieri, Marche, spiaggia mista.

Abstract

This paper presents the results obtained from a field experiment focused on sand and gravel transport on a microtidal beach. The work was carried out through the use of fluorescent tracers, accurate topographic surveys and granulometric samples.

The target of the experiment was to understand the directions of sediment transport on a beach close to a river mouth, with the main characteristic of a mixed granulometry consisting of sand and pebbles. This kind of beach is characterized by a strong variability affecting the grain size, with possible hourly variations.

The studied beach presents a marked steepness, so that it is possible to classify it as a reflective beach with a well defined beach-step.

The experiment was carried during high energy wave conditions, generated by predominant South-East winds typical of this area (Sirocco). The “extreme” conditions observed during the experiment (compared to the Adriatic wave climate) partly permitted to quantify the long-shore transport rate; due to high long-shore current velocities, the tracer concentration decreased rapidly, permitting only a partial recovery the initial tracer mass. Because of the fast dilution, data with a recovery percentage lower than 60% had not been considered.

Studying the morphologic evolution and the granulometric distribution, the spreading pathways of the injected material were reconstructed, showing partly a long-shore and partly a cross-shore sediment movement, differentiated as a function of sediment size. The results of the work outline how, in high energy conditions, the pebble fraction tends to settle in the deepest part of the swash-zone, while the sand tends to move towards the upper part of the swash.

It has also been noticed that during low energy conditions, pebble deposits, not seen at the beginning of field work, were created.

Future works will investigate the role of this particular size fraction on the long and cross-shore sediment transport.

Keywords: *fluorescent tracers, Adriatic, coastal sediments, Marche, mixed granulometry.*

Premessa

Fin dagli albori della ricerca sul trasporto sedimentario, la sperimentazione sulla dinamica del trasporto lungocosta si è resa conto del potenziale che può avere il materiale reso “identificabile” tramite colorazione artificiale o irraggiamento radioattivo. I traccianti artificiali sono essenzialmente granuli che possono essere identificati all’interno di volumi di sedimento di cui sono considerati rappresentativi. Nonostante il concetto sia qualitativamente simile ai traccianti mineralogici (ad es. minerali pesanti), l’uso dei traccianti artificiali mira a studi di tipo quantitativo.

Nonostante gli ultimi 20 anni di ricerca sul trasporto di sedimenti siano stati caratterizzati dallo sviluppo di sensori ottici ed acustici per la quantificazione delle concentrazioni di sedimento sospeso, il metodo dei traccianti rimane l’unica tecnica che può essere applicata essenzialmente a qualunque scala spaziale e temporale. Del resto buona parte degli studi di calibrazione delle formule per il trasporto dei sedimenti hanno utilizzato traccianti fluorescenti. Il più famoso è forse quello di Komar e Inman (1970), che ha calibrato la formula per il calcolo del trasporto lungocosta in funzione del flusso di energia, comunemente nota come “formula del CERC”, contenuta nel Coastal Engineering Manual (U.S. Army Corps of Engineers, 2006). La tecnica di colorare sabbie con vernice fluorescente è probabilmente nata in Russia alla fine degli anni ’50 (Zenkovith, 1960) ed inizialmente utilizzava delle colle contenenti pigmenti fluorescenti. Risale però al lavoro di Ingle nel 1966 il primo “manuale” sulla colorazione utilizzando vernici. Negli anni ’70 venne tentato il più grande esperimento sinora conosciuto da Chapman e Smith (1977) sulla Gold Coast, in Australia. In quel caso si pensò di iniettare la sabbia utilizzando una draga, che stava svolgendo delle operazioni di ripascimento.

Il metodo ha incontrato una nuova popolarità verso la metà degli anni ’90, con un gruppo di ricercatori in Portogallo che hanno standardizzato la colorazione ed il campionamento successivo all’iniezione (Ciavola et al., 1997a; 1998). Nonostante inizialmente il metodo sia stato sperimentato soprattutto su spiagge rettilinee, gli stessi ricercatori lo hanno in seguito applicato a varie situazioni, dai canali tidali tra isole barriera (Vila-Concejo et al. 2004) allo studio dell’interramento di canali di accesso portuale (Vila-Concejo et al., 2003). Uno degli ultimi lavori degni di nota, ove l’impiego dei traccianti fluorescenti viene associato all’uso di sensori OBS e di trappole sedimentarie, è sicuramente quello di Tonk e Masselink (2005) sulle coste dell’Australia. I metodi per quantificare il trasporto attraverso un’esperienza con traccianti sono vari. Il primo ad essere applicato è stato quello **dell’integrazione spaziale (SIM)**, usato ad esempio, da Komar ed Inman (1970); in questo caso i campioni vengono raccolti su di una maglia prestabilita, in modo da poter determinare la concentrazione dei traccianti in ogni campione e disegnare così una mappa di dispersione. Per quanto riguarda tale tecnica è di particolare importanza l’individuazione della profondità di rimescolamento, detta anche *mixing depth* (spessore interessato dal moto ondoso e alle correnti in periodi di ore), o di quella di rimobilizzazione, *disturbance depth* (considera anche l’erosione o la sedimentazione e quindi si riferisce ad un ciclo mareale o ad un evento di tempesta) (Eliot e Clarke, 1988). Per ulteriori dettagli su questi parametri, le loro relazioni con il moto ondoso e le caratteristiche della spiaggia si rimanda a studi precedenti (Kraus 1985; Ciavola et al., 1997b; Ferreira et al., 2000; Gonzalez et al., 2004; Anfuso, 2005). Per determinare la *mixing depth*, durante

la bassa marea si inseriscono dei *rods* (aste di misurazione, generalmente tondini in ferro o acciaio) nella sabbia. Queste aste metalliche vengono associate ad una rondella (Greenwood e Hale, 1980) che si muove verso il basso, assestandosi sulla nuova superficie della spiaggia; lo spessore della sabbia che si è depositata sulla rondella è la profondità di rimobilizzazione (Fig. 1). Nel caso ci sia solo sedimentazione la rondella si trova sempre alla stessa altezza iniziale ma si osserva sedimento al di sopra.

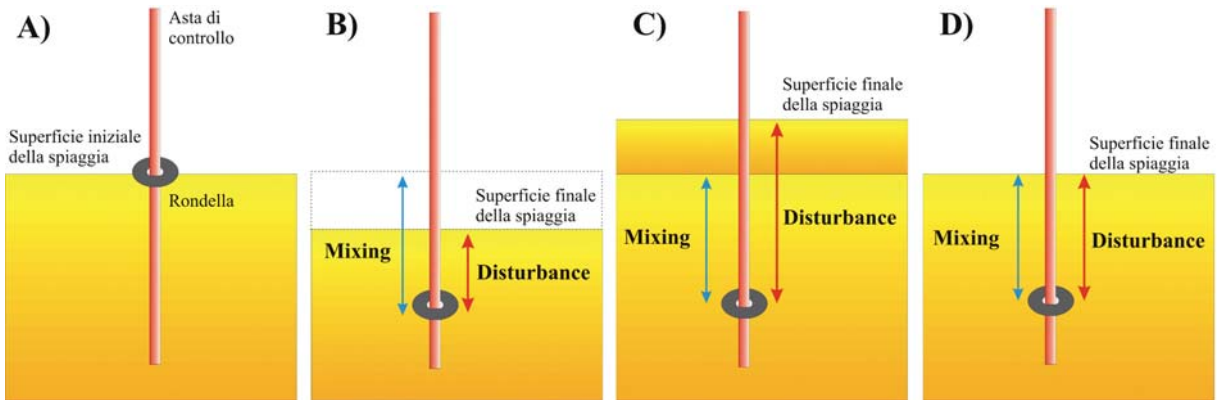


Figura 1 - *Disturbance e mixing depth*: A) situazione iniziale; B) erosione; C) sedimentazione; D) fondo in equilibrio.

Un altro metodo è quello della ‘integrazione temporale’ (TIM), usato per la prima volta da Kraus et al. (1982). Secondo questo metodo i campioni vengono raccolti sempre nello stesso punto, con un intervallo di 15 minuti per un periodo di 3-5 ore, con l’obiettivo di stabilire in che momento si abbia il passaggio della massima concentrazione di sedimento colorato. Si ricorda che anche per questo metodo è fondamentale conoscere la profondità di *mixing*.

Il terzo metodo è quello della ‘diluizione’, utilizzato per primo da Russell (1960), che consiste nell’inserimento continuo di traccianti in un punto e nello stabilire la sua concentrazione ad una determinata distanza dal punto di iniezione. L’equilibrio nella concentrazione dei traccianti dipenderà dalla capacità di diluizione del trasporto litorale e questo fornirà una media del trasporto. Il problema di questa tecnica sta nella gran quantità di traccianti che bisogna utilizzare per raggiungere l’equilibrio, anche se ha il vantaggio di non dover conoscere la profondità di *mixing*.

Vi è inoltre la possibilità di utilizzare simultaneamente traccianti di diversi colori iniettandoli in punti diversi oppure colorando diversamente varie granulometrie per capire il comportamento di ognuna di esse. Le problematiche più frequenti e difficili da risolvere nell’uso dei traccianti fluorescenti sono la resistenza all’abrasione del colore e la difficoltà di campionamento in cattive condizioni meteomarine, soprattutto in spiagge con una escursione mareale bassa.

La spiaggia di Porto Recanati ha caratteristiche sedimentologiche molto diverse da tutte quelle ove altri autori hanno svolto studi con traccianti, trattandosi di una spiaggia mista di sabbia e ghiaia, che presenta quindi un’elevata variabilità granulometrica a livello spaziale e temporale.

Da studi morfologici effettuati da altri autori su spiagge di questo tipo, emerge che la presenza della frazione più grossolana si fa più importante sulla spiaggia emersa in periodi di bassa energia del moto ondoso. Esiste una relazione di tipo inverso tra la presenza di ghiaia/ciottoli ed energia delle onde (Ekwurzel, 1988). A periodi alto-energetici invernali si associano piccole quantità di sedimento grossolano che, al contrario, si accumulano in grandi quantità durante l’estate. Ekwurzel (1988) aveva inoltre notato che nei periodi basso-energetici la dimensione media dei grani aumentava muovendosi dalla parte alta della spiaggia verso la zona di battigia. Secondo Nordstrom e Jackson (1993) durante le mareggiate il sedimento grossolano viene eroso dalla spiaggia emersa e trasportato al piede della battigia. Nelle fasi immediatamente successive alle mareggiate, il recupero del profilo di spiaggia avviene tramite deposizione della frazione sabbiosa in battigia, con formazione della berma. Successivamente, con il persistere di condizioni di bassa energia, tornano a depositarsi le frazioni più grossolane (ghiaia e ciottoli).

Con questo studio si voleva esaminare la differenziazione granulometrica, su una spiaggia caratterizzata da materiale eterogeneo, al variare delle condizioni energetiche. Nell'esperimento oggetto di questo lavoro si sono analizzate solo le granulometrie comprese tra la sabbia e la ghiaia, poiché la frazione ciottolosa è apparsa sulla spiaggia solo nelle fasi finali dell'esperimento.

Sito di studio

Il sito oggetto dello studio (Fig. 2), è costituito da un breve tratto di litorale (circa 1 km) in prossimità della foce del fiume Potenza, nel comune di Porto Recanati, in provincia di Macerata. Il tratto di costa in questione presenta una dinamica costiera molto attiva, testimoniata da processi di erosione della linea di riva e da una granulometria varia e poco uniforme che permette di classificare questa spiaggia tra quelle di tipo misto. I principali bacini che forniscono un apporto di sedimento a questo tratto di litorale sono il fiume Potenza ed in minor quantità il fiume Musone, che è però situato diversi chilometri più a nord della spiaggia in questione. Secondo i dati raccolti dalla Regione Marche nell'ambito del Piano di Difesa della Costa (www.autoritabacino.marche.it), la spiaggia a sud dell'abitato di Porto Recanati è composta mediamente da un 23% di sabbia, un 12% di sabbia ghiaiosa, un 17% di ghiaia sabbiosa ed un 48% di ghiaia.

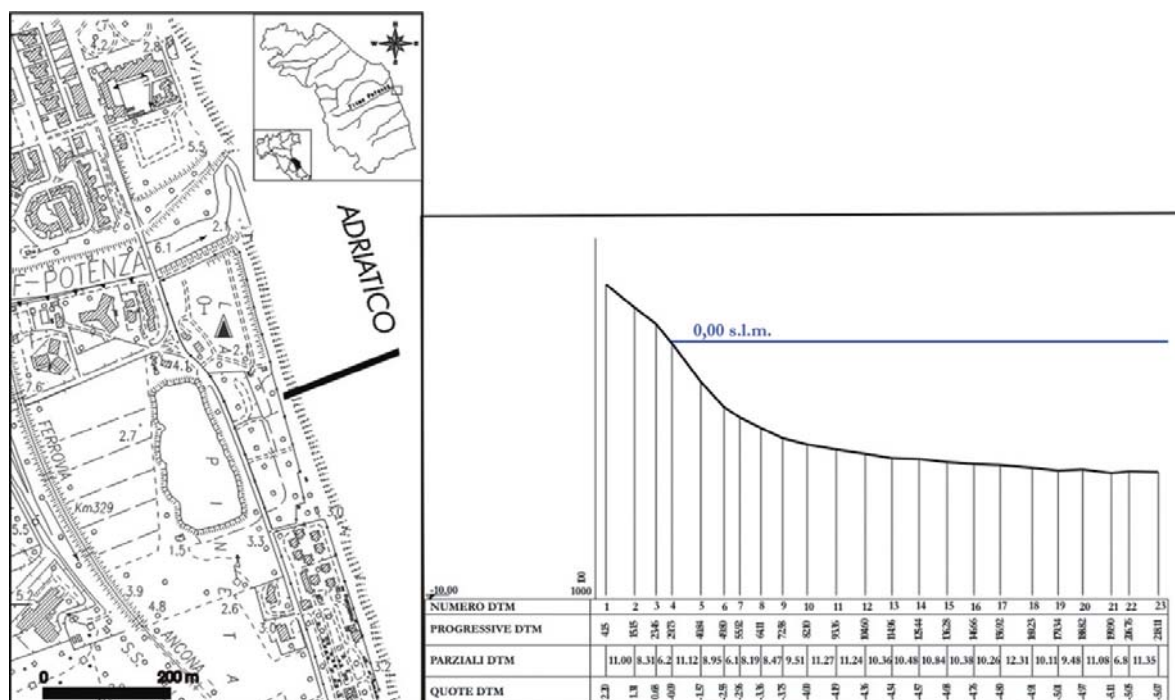


Figura 2 - Area di studio e profilo topo-batimetrico della parte centrale della zona di studio, effettuato dalla Regione Marche nel mese di luglio 2005.

Su questa spiaggia, dal dopoguerra ad oggi, si è instaurato un consistente deficit di sedimento dovuto alla drastica diminuzione del trasporto solido di fondo da parte del fiume, avvenuta dopo il 1960. La diminuzione del trasporto solido è da porre in relazione con l'enorme sviluppo delle attività antropiche nella zona d'alveo, come ad esempio le cave di estrazione della sabbia, fenomeno che ha interessato buona parte dei litorali italiani nel dopoguerra e che nelle Marche sono state vietate con una legge regionale del 1976.

Materiali e metodi

Per questo esperimento si è deciso di utilizzare una spaziatura di 50 metri tra i profili di campionamento, che sono stati numerati partendo dal punto di iniezione (Pr0). Si è aggiunta una N al numero del profilo per quelli posti a nord ed una S per quelli a sud. Su ogni profilo si ha una spaziatura di 2.5 metri tra i punti campionati sulla spiaggia emersa.

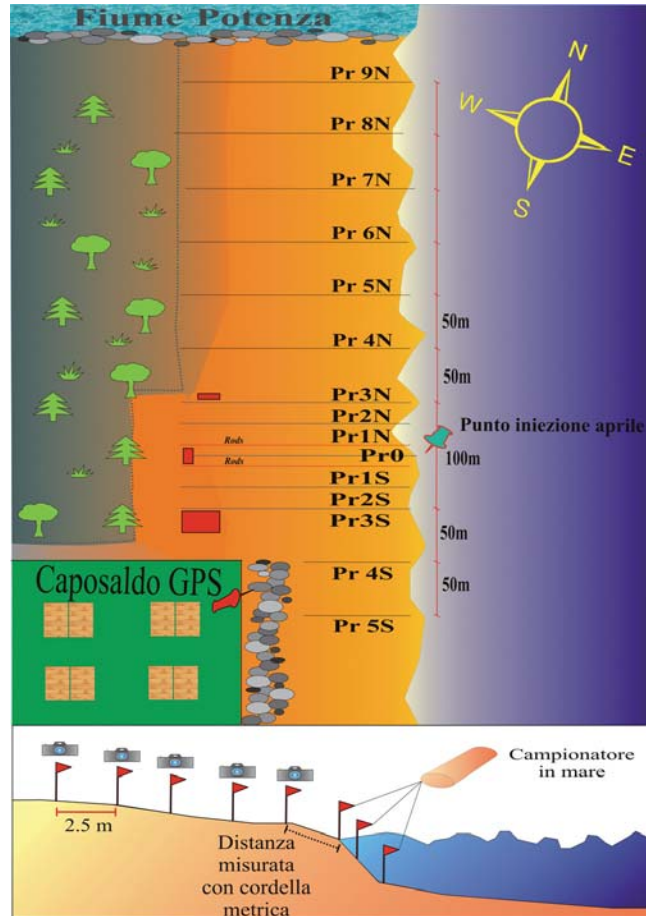


Figura 3 - Ubicazione e denominazione dei profili stabiliti per il monitoraggio dello spostamento del tracciante, dei rods e del punto di iniezione. Nella parte bassa della figura si evidenziano la posizione dei campioni e la tecnica di campionamento impiegata lungo ciascun profilo.

I campioni sulla spiaggia emersa sono stati posizionati tramite DGPS, quelli a mare tramite cordella metrica estesa dall'ultimo punto rilevato tramite DGPS (Fig. 3). Sono stati inoltre inserite due file di rods lungo i profili Pr1N e Pr1S. La distanza tra un rod ed il successivo era di 2.5 metri (Fig. 3).

Traccianti fluorescenti

Per la procedura di marcatura del sedimento, ci sono vari tipi di resine e colori che possono essere utilizzati. Il requisito principale per il colore è quello di essere resistente all'abrasione chimica e meccanica causata dall'acqua di mare. Inizialmente, sostanze come agar (colla di alga), colla d'ossa, gomma e amido erano impiegati come legante (Zenkovitch, 1960), mentre in seguito si è passato a colori acrilici, che offrono una migliore resistenza all'abrasione (Yasso, 1966). Vari studi in ambiente Atlantico ed Adriatico hanno identificato nelle vernici fluorescenti solubili in toluene il miglior compromesso tra resistenza all'abrasione e costo (Taborda et al., 1994; Ciavola et al., 1997a; Ciavola et al., 1998, Ciavola et al., 2005). Questi ultimi autori hanno delineato una metodologia standardizzata per la preparazione del tracciante tramite l'uso di una piccola betoniera da cantiere e l'immissione della vernice estremamente diluita. In seguito la sabbia viene lasciata in betoniera, che continua a ruotare, finché il colore è prossimo all'asciugatura. È stato trovato che, in questo modo, il colore forma un sottile strato intorno al granulo e, soprattutto, si diminuisce la percentuale di materiale aggregato, specialmente se la sabbia viene essiccata rapidamente all'aria aperta e sotto il sole. Qualora piccoli aggregati siano presenti, la sabbia può essere setacciata con maglie appropriate, in modo da non alterare la similitudine tra la popolazione granulometrica nativa e quella del tracciante. Va infine ram-

mentata la necessità di utilizzare vernice ad alta fluorescenza in seguito ad esposizione sotto luce UV. La giustificazione nasce dall'esigenza di poter identificare i grani colorati una volta dispersi all'interno della massa di sedimento con colorazione naturale.

Va fatto notare che gli studi citati sopra avevano utilizzato sedimenti di spiaggia con granulometria massima corrispondente alla sabbia media, provenienti da popolazioni granulometriche ben cernite ed essenzialmente unimodali. Poiché le popolazioni granulometriche del sedimento della spiaggia in questione presentano un'elevata quantità di ghiaia, si è deciso di testare separatamente il metodo di colorazione sulla frazione ghiaiosa da quella sabbiosa.

Per lo svolgimento del test di colorazione qui descritto, si è utilizzata una piccola betoniera elettrica con la quale si coloravano non più di 20-30 kg di sedimento per volta. Si decideva di colorare la parte con granulometria inferiore ai 2 mm con vernice verde e quella con granulometria superiore con vernice rossa, eseguendo la separazione delle due frazioni granulometriche mediante vagliatura.

Le vernici scelte erano a base acrilica con pigmenti fluorescenti, ossia in grado di rimettere immediatamente la luce assorbita. Si sono effettuate diverse prove per ottenere il rapporto ottimale tra vernice e diluente (toluene), in quanto all'aumentare della granulometria si ha una diminuzione della superficie specifica e quindi bisogna ridurre la quantità di colore in modo da non creare un composto troppo denso e facilmente raggrumante.

Si è deciso di iniettare per l'esperimento un quantitativo di sabbia colorata pari a 200 kg. E' importante ricordare che il sedimento colorato deve essere accuratamente lavato con acqua ed una piccola dose di sapone prima di essere iniettato, per evitare che tenda a formare grumi o a galleggiare in superficie. In campagna veniva utilizzata la tecnica dell'iniezione puntuale e del campionamento tramite integrazione spaziale (SIM). Lo studio della dispersione veniva effettuato utilizzando una camera ad ultravioletti portatile, montata su un quad (Fig. 4).

Il conteggio dei grani traccianti veniva effettuato *in-situ*, permettendo quindi di ottimizzare la spaziatura delle griglie di campionamento. Per il conteggio automatizzato dei granelli di sabbia fluorescente presenti all'interno delle immagini veniva elaborata una routine in ambiente Matlab, con calibrazione dell'algoritmo di detezione in laboratorio, considerando il possibile effetto della perdita di colore superficiale in seguito ad abrasione.

L'intera gamma dei colori è funzione della combinazione dei valori RGB, sono perciò possibili 256^3 sfumature diverse, per un totale di oltre 16 milioni di colori (le immagini RGB vengono anche definite *true color*).



Figura 4 - Camera UV portatile montata sul veicolo utilizzato.

Se la fotografia viene scattata sotto una fonte di luce UV, grazie allo sfondo dell'immagine molto scuro, occupato da granelli di sabbia normale non fluorescenti, i grani verniciati risaltano chiaramente rispetto al resto dell'immagine (Fig. 6).

I colori delle vernici fluorescenti utilizzate per l'esperimento vengono individuati attraverso il processamento di ogni pixel dell'immagine, considerando il variare dei tre valori RGB all'interno di range specifici validi per il riconoscimento.

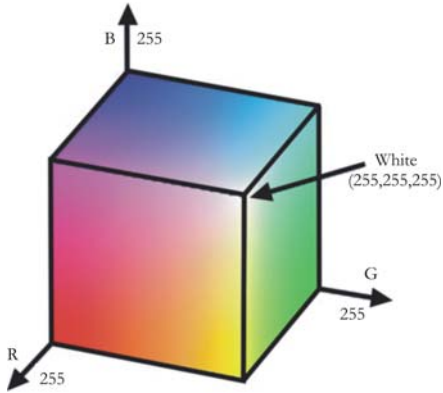


Figura 5 - Visualizzazione tridimensionale dell'intera gamma di colori RGB (modificato da guida Matlab).



Figura 6 - Ingrandimento di una immagine UV con presenza di granelli colorati.

Il principio su cui si fonda il riconoscimento dei granelli d'interesse si basa sulla scomposizione dell'immagine nelle sue tre matrici RGB e sull'analisi separata dei massimi relativi a ciascuna matrice.

Plottando separatamente, come una superficie, le tre matrici RGB (Fig. 7), si notano le variazioni dei singoli valori per ogni pixel, che combinati insieme restituiscono il colore presente nel pixel dell'immagine originale. L'algorithmo di detezione evidenzia quindi le zone con massimi relativi superiori a determinate soglie, controllando che nelle zone in questione siano verificati i range di appartenenza al colore delle vernici usate. Come controllo aggiuntivo le zone selezionate sull'immagine RGB vengono trasformate nel formato HSV (Hue, Saturation, Value) dove si procede ad un'ulteriore verifica della discriminazione svolta in banda RGB. Il risultato della routine fornisce, in matrici separate costituite da valori binari (Fig. 8), i gruppi di pixel che hanno superato l'analisi, calcolando il numero di granelli colorati e la rispettiva area. Questa viene infine rapportata all'area totale dell'immagine per ottenere una concentrazione superficiale del tracciante.

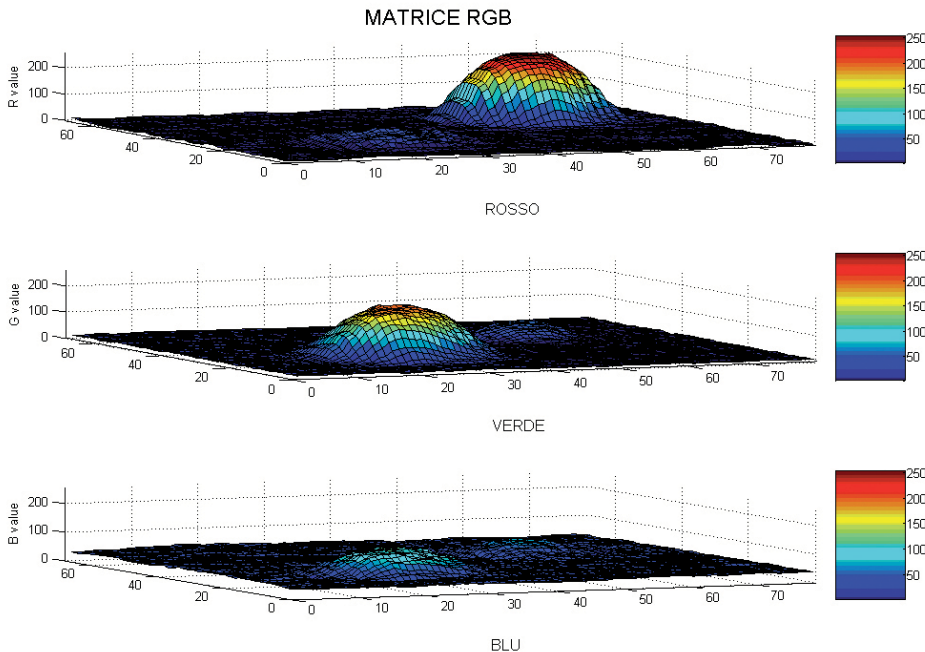


Figura 7 - Separazione della matrice RGB relativa alla foto in Figura 6.

Assi di transito sedimentario

Come tentato precedentemente da Pedreros et al. (1996) per lo studio di barre intertidali, un'ulteriore conferma di risultati sulla dispersione del tracciante può provenire dall'applicazione di modelli statistici come quello di McLaren (1981), che prende in considerazione il fatto che, in un ambiente sedimentario, i parametri granulometrici variano lungo la direzione di trasporto netto. Questa variazione spaziale dei parametri dimensionali è controllata dalle caratteristiche della distribuzione granulometrica dell'area sorgente e dall'azione dei processi sedimentari come erosione, trasporto e deposizione selettiva e massiva (McLaren, 1981).

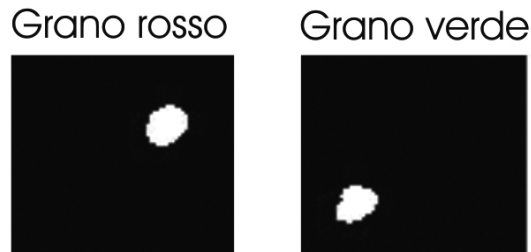
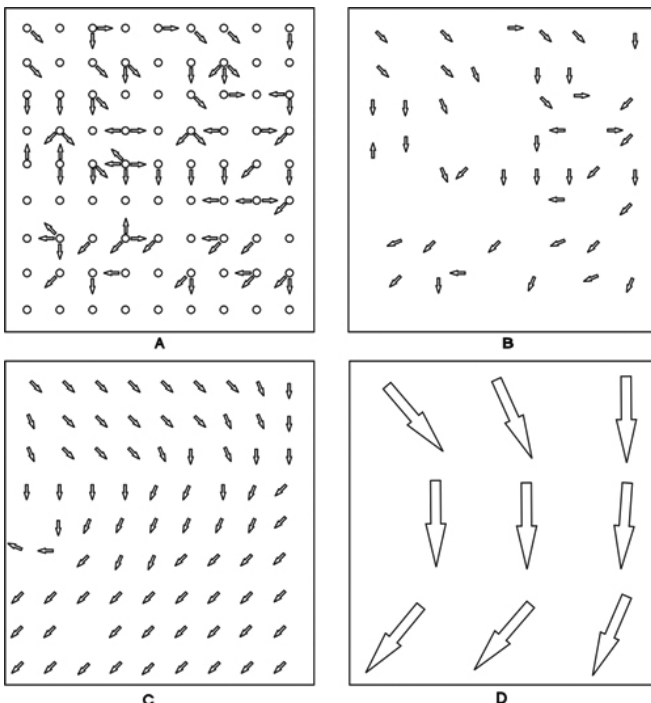


Figura 8 - Matrici binarie risultanti dalla routine per i due colori.

I principi proposti da McLaren (1981) si basano sulla comparazione delle variazioni fra i tre parametri sedimentologici più usati: la media (m_T), la classazione (s_T) e l'asimmetria (Sk_{T2}). L'originalità di questo concetto risiede nell'utilizzo simultaneo di questi tre parametri statistici nella procedura di trattamento analitico dei dati, per mettere in evidenza le affinità tra i campioni prelevati e la loro espressione sotto forma di vettori di trasporto sedimentario (McLaren e Bowles, 1985; Lanckneus et al., 1992).

Quando una sorgente sedimentaria subisce erosione, ed il sedimento trasportato viene completamente depositato, tale deposito deve avere granulometria più fine, classazione migliore ed asimmetria più negativa rispetto alla sorgente. Se si ha un trasporto selettivo, anche la deposizione sarà selettiva ed il deposito risultante potrà essere più fine o più grossolano rispetto alla sorgente, ma la classazione sarà migliore e l'asimmetria più positiva. Le eccezioni a questi principi suggeriscono che non è possibile identificare un ambiente deposizionale o un processo sedimentario con una singola distribuzione granulometrica, ma che è necessario il confronto fra più distribuzioni (McLaren, 1981).



Gao e Collins (1991, 1992), sullo stesso principio di base hanno trasformato il carattere unidimensionale del metodo di McLaren in carattere bi-dimensionale (carattere lineare: i campioni sono infatti raccolti lungo una linea, come per esempio una spiaggia). Per conservare poi solo i casi significativi di un trasporto reale, gli stessi autori hanno utilizzato una tecnica semi-quantitativa di filtraggio del "rumore di fondo" (Fig. 9).

Si ottiene così, dall'insieme dei vettori trasporto, il 'modello residuale' del trasporto. Esso consiste nel selezionare le direzioni di trasporto più frequenti del modello iniziale, stabilite a partire dai vettori trasporto (Fig. 9d). Le tecniche di filtraggio hanno infatti permesso di scartare le direzioni poco frequenti (Gao e Collins, 1992).

Figura 9 - Procedura schematica del trattamento dei dati in 2D. a: vettori trasporto ottenuti dal calcolo statistico; b: vettori somma; c: operazione di filtraggio; d: definizione della direzione di trasporto (modificato da Gao e Collins, 1991).

Per applicare il modello di McLaren-Gao e Collins, è stato utilizzato il programma denominato "DERSEDI Version 2" (© Service Hydrographique et Oceanographique de la Marine, SHOM, France).

Per applicare questo modello è stato necessario effettuare analisi granulometriche su 37 campioni raccolti in corrispondenza delle foto UV del 6 aprile 2006, mediante setacciatura ad 1/2 a secco. I dati granulometrici sono stati elaborati per la determinazione dei parametri statistici di Folk e Ward (1957): dimensione media, sorting, skewness.

Risultati e Discussione

Variazioni morfologiche

Dal rilievo topografico effettuato il 3 aprile 2006 si nota come la spiaggia tenda a restringersi verso la zona prossima alla foce del fiume (Fig. 10). Dai profili si vede la notevole pendenza (circa 11%) che inserisce questa spiagge tra quelle "riflettenti" secondo la classazione di Wright e Short (1984). Il 4 aprile 2006 sono state inserite due file di rods in corrispondenza dei profili Pr1-N e Pr1-S (Fig. 11).

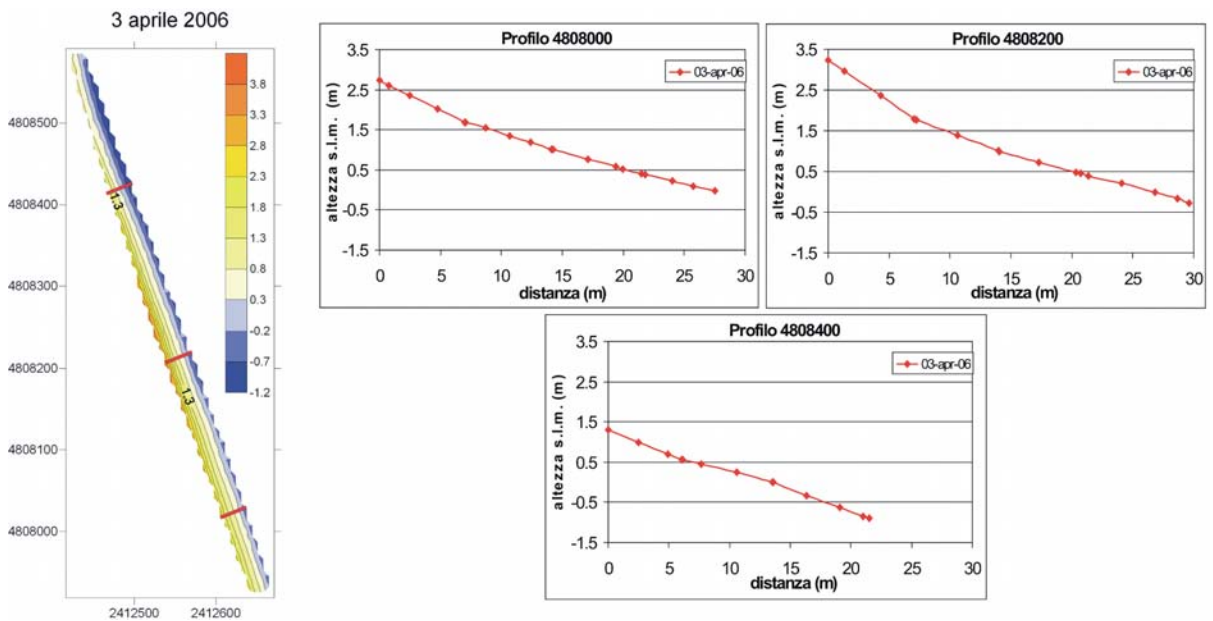


Figura 10 - Rilievo topografico del 3 aprile 2006.

Dai rods si è riusciti ad evidenziare che le profondità di mixing sulla battigia risultano assestarsi sempre sui 8-10 cm, mentre nella parte alta non superano mai i pochi millimetri (Fig. 12 e Tab. 1).

Andando ad analizzare i profili ottenuti dai rods si nota come, dopo 5 ore (ore 17 del 4 aprile) dall'inizio dell'acquisizione dei dati, si sia avuta una leggera accrezione sulla battigia a discapito della zona limitrofa topograficamente più alta, soprattutto lungo il profilo nord.

Questa tendenza sembra essere costante fino al rilievo delle ore 16:00 del 5 aprile 2006, dopo di che, a causa delle forti mareggiate da sud avutesi nelle ore precedenti, si nota come tutta la parte alta della spiaggia sia in forte erosione e che il sedimento va a depositarsi all'altezza della battigia.

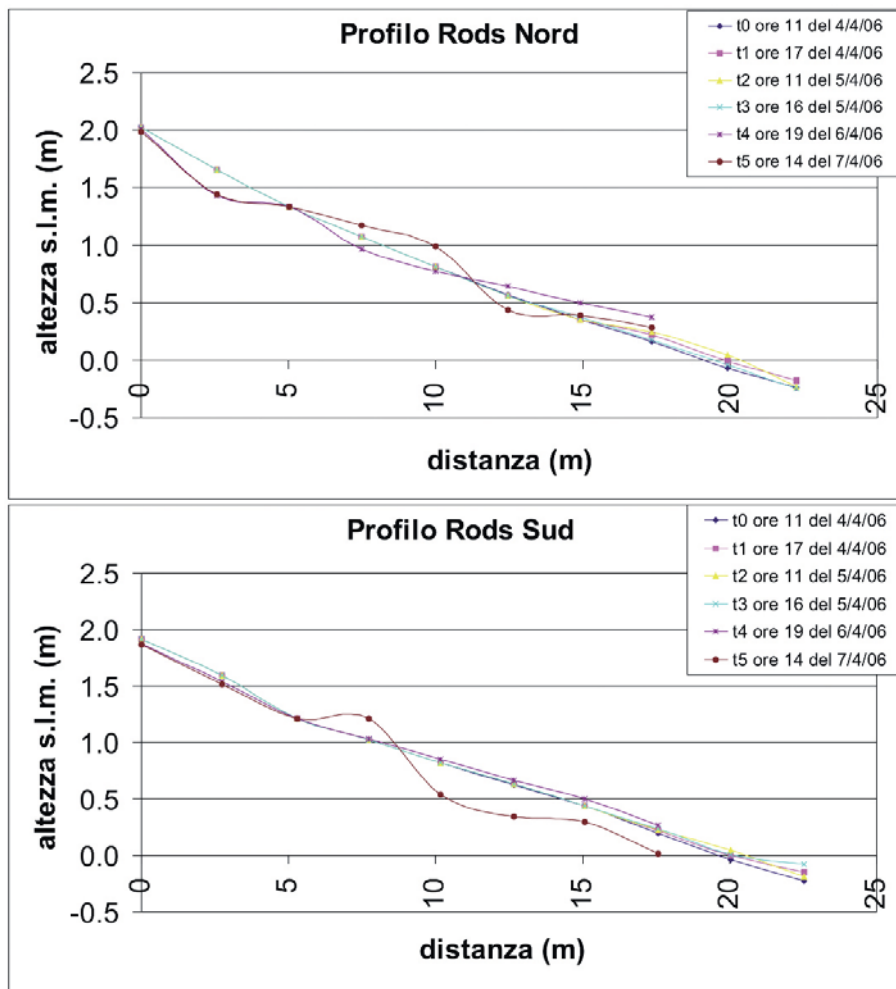


Figura 11 - Profili ottenuti dai rods situati a Nord ed a Sud del punto di iniezione.

L'ultimo rilievo (ore 14 del 7 aprile 2006) mette in evidenza come, in seguito all'arrivo di una mareggiata proveniente da N-NE, si cominci a riavere una sedimentazione nella parte medio-alta della spiaggia, con traslazione di sabbia proveniente dal piede della battigia.

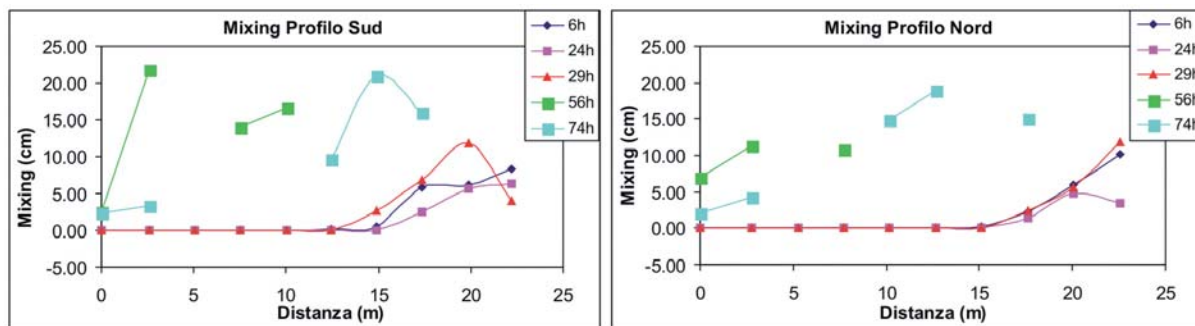


Figura 12 - Profondità di mixing lungo i due profili di rods (le sezioni mancanti sono dovute alla perdita di alcuni rods).

Tabella 1 - Parametri del mixing.

Tempo da t0	Mixing max	Mixing medio	Dist. Run-up max da Mixing max
6 h	10.2 cm	4.4 cm	10.5 m
24 h	6.3 cm	4 cm	4.9 m
29 h	11.9 cm	6.5 cm	7.3 m
56 h	21.9 cm	12 cm	n.d.
74 h	21 cm	10.75 cm	n.d.

Dispersione dei traccianti

I 200 Kg di sedimento colorato sono stati iniettati il 4 aprile 2006 dalle ore 15:00 alle 15:10 nella zona di swash, proprio a metà distanza tra i due profili di rods.

Al momento dell'iniezione il vento aveva direzione N-NE, con onde provenienti da N con un angolo di 30° rispetto alla linea di riva. Circa 3 ore dopo l'iniezione (quindi verso le ore 18:00) si sono iniziate le operazioni di monitoraggio dello spostamento del sedimento colorato.

La dominanza di venti provenienti da N-NE e onde provenienti da nord, ci ha portato a condurre le indagini principalmente verso sud, fino ad una distanza di circa 200 metri dal punto di iniezione.

Come spiegato in precedenza, l'analisi è stata effettuata direttamente sul posto attraverso la camera oscura ad UV (Fig. 2) ispezionando più intervalli sabbiosi per ogni punto di campionamento, tramite scavo di trincee.

Per quanto riguarda i punti nella zona di spiaggia sommersa, che quindi non potevano essere fotografati, si è effettuato il prelievo diretto di campioni fino alla -1 m che successivamente sono stati fotografati su fondo scuro.

Andando ad analizzare le nuvole di dispersione (Fig. 13) sia del tracciante grossolano (rosso) che del più fine (verde) si nota come in quattro ore il centro di massa si fosse spostato verso sud di circa 100 m e quindi con una velocità media pari a $5 \cdot 10^{-3}$ m/sec (Tab. 2). Il tracciante sembra muoversi soprattutto ortogonalmente alla spiaggia verso il piede della battigia. Purtroppo non si è avuta la possibilità di campionare a profondità superiori alla -1 m a causa delle condizioni meteomarine poco favorevoli.

Il 5 aprile 2006 sono state effettuate due operazioni di monitoraggio del tracciante. La prima nella mattina tra le ore 10:00 e le 12:00 (Fig. 14), la seconda di sera tra le 18:00 e le 20:00. Esaminando le mappe di dispersione corrispondenti alle misure della mattina, si riscontra subito un cambiamento nella direzione di dispersione del tracciante, a causa del mutamento delle condizioni meteomarine, che nella nottata precedente avevano visto un ribaltamento della direzione di provenienza del vento (vento da S-SE, onde da S con un angolo di 30° rispetto alla linea di riva).

Sarebbe stato di grande utilità avere a disposizione i dati della boa ondometrica della RON situata davanti ad Ancona, ma purtroppo per il periodo in questione non ve ne sono disponibili, molto probabilmente per una avaria del sistema di acquisizione.

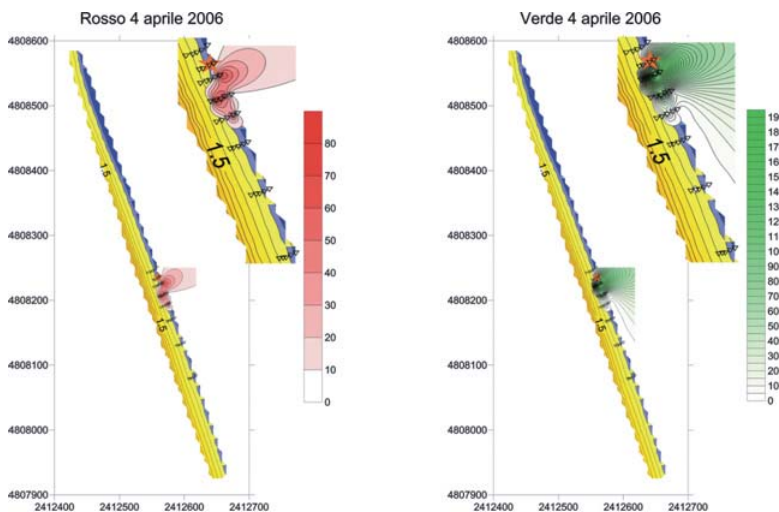


Figura 13 - Nuvole di dispersione dei traccianti rossi (a sinistra) e verdi (a destra) dopo 4 ore dall'iniezione (la scala indica il numero di grani colorati per m³). I triangolini neri rappresentano i punti di campionamento.

Si è deciso di omettere le mappe di dispersione relative ai giorni in cui la percentuale di recupero scendeva sotto il 60%, poiché risultavano poco interpretabili visivamente.

Andando comunque ad osservare i due traccianti in maniera separata, si vede come la granulometria più fine (verde) si sia spostata a velocità leggermente superiore rispetto al grossolano rosso. Difatti, nelle circa 16 ore trascorse dal rilievo precedente, il centro di massa del primo è stato traslato sino ad una distanza di 130 m a nord del punto di iniezione (velocità di circa $2.3 \cdot 10^{-3}$ m/sec), mentre il secondo non supera i 70 metri e quindi la sua velocità può considerarsi pari a circa metà del precedente.

Cosa molto importante da notare è la concentrazione (di conseguenza anche la percentuale di recupero) di granelli colorati, che è diminuita rispetto al giorno precedente, sintomo di una possibile perdita verso mare ove si era nell'impossibilità di campionare. La perdita di concentrazione di tracciante si fa ancora più evidente nel rilievo della notte. Anche le diverse interpolazioni geostatistiche sembrano suggerire la dominanza di trasporto *cross-shore* a causa delle condizioni di moto ondoso, con mare molto mosso ed onde da S-SE di circa 1.5 m alla frangenza.

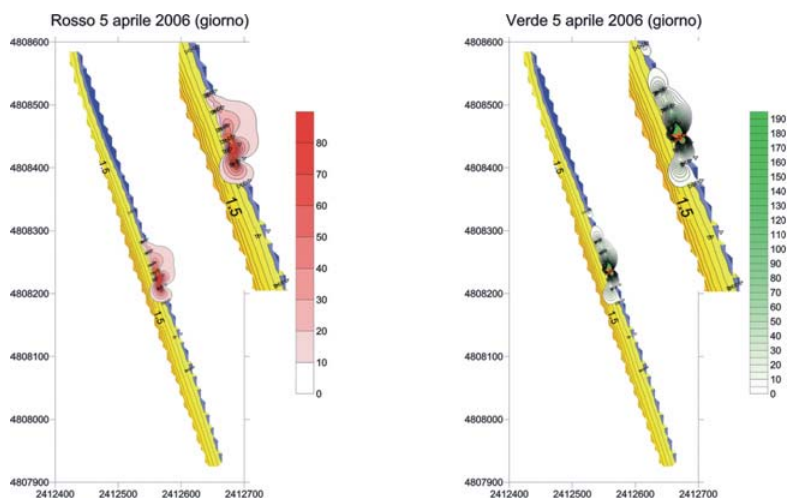
Infatti, il tracciante rosso (ghiaia) comincia ad essere ritrovato soprattutto al piede della battigia ed a distanze che non superano i 50 metri dal punto di iniezione. Anche per quanto riguarda il verde (sabbie), le concentrazioni diminuiscono drasticamente, ma si ritrova in parte anche sulla parte alta della spiaggia.

Tabella 2 - Velocità del centro di massa e percentuale di recupero per ogni colore.

Data rilievo	Velocità centro di massa rosso (ghiaie)	Percentuale di recupero (%RT) rosso	Velocità centro di massa verde (sabbie)	Percentuale di recupero (%RT) verde
4 aprile 06 ore 15	Iniezione	—	Iniezione	—
4 aprile 06 ore 20	$5 \cdot 10^{-3}$ m/sec	85%	$5 \cdot 10^{-3}$ m/sec	80%
5 aprile 06 ore 12	$1.2 \cdot 10^{-3}$ m/sec	60%	$2.3 \cdot 10^{-3}$ m/sec	55%
5 aprile 06 ore 20	$1.2 \cdot 10^{-3}$ m/sec	20%	$2.3 \cdot 10^{-3}$ m/sec	30%
6 aprile 06 ore 15	n.d.	Minore del 10%	n.d.	Minore del 10%
7 aprile 06 ore 12	n.d.	Minore del 10%	n.d.	Minore del 10%

Il 6 aprile 2006 il regime meteomarinario si presentava con vento da S-SE e onde provenienti da S con un angolo di 30° rispetto alla linea di riva (generando trasporto lungo costa verso nord). Si è osservata visivamente onda lunga da S-SE (altezza d'onda di circa 1.5 m) e mare molto mosso.

Il sedimento ghiaioso (rosso) si trovava ormai solo in tracce sulla spiaggia emersa a nord della zona di iniezione fino a circa 300 metri dal punto di iniezione. Data la bassa quantità di tracciante recuperato (inferiore al 10%) la velocità del centro di massa non veniva calcolata (Tab. 2).



Per quel che riguarda il verde (sabbie) si notano concentrazioni più elevate soprattutto in corrispondenza della foce del fiume Potenza.

Per quel che riguarda il verde (sabbie) si notano concentrazioni più elevate soprattutto in corrispondenza della foce del fiume Potenza.

Figura 14 - Nuvole di dispersione dei traccianti rossi (a sinistra) e verdi (a destra) alle ore 12 del 5 aprile 2006 (la scala indica il numero di grani colorati per m²). I triangolini neri rappresentano i punti di campionamento.

Il 7 aprile 2006, con condizioni di vento da N-NE e onde provenienti da N con un angolo di 20° rispetto alla linea di riva e trasporto verso sud, il mare risultava molto mosso, con onde che raggiungevano il limite superiore della spiaggia e rendevano difficili i rilievi. Si è riusciti comunque ad acquisire un numero tale di campioni sufficiente all'analisi della dispersione dei traccianti.

Dall'analisi statistica si riesce ancora una volta a dedurre come ormai gran parte del sedimento grossolano rosso sia andato a depositarsi al piede della battigia, mentre il verde riesce a depositarsi nella parte alta della spiaggia andando così a determinare una vera e propria classazione del sedimento.

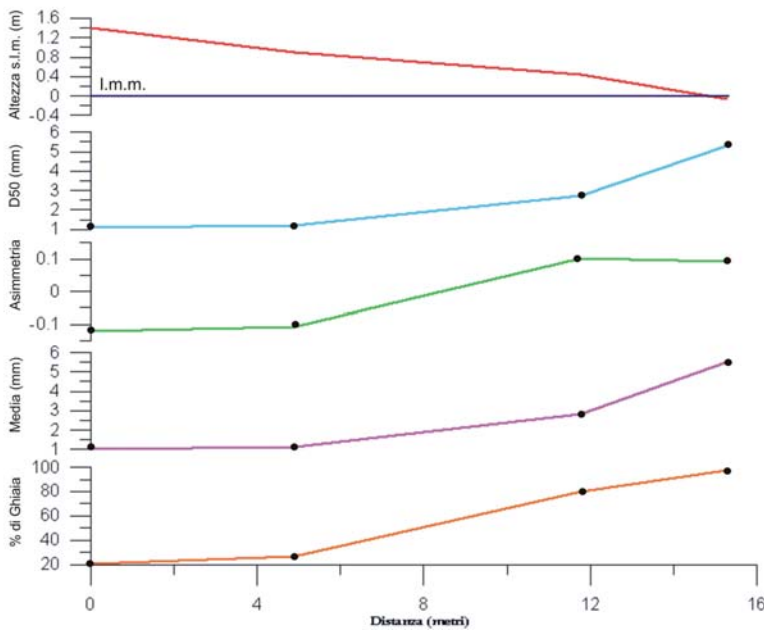


Figura 15 - Relazione tra la posizione dei campioni lungo il profilo (figura in alto) ed i parametri granulometrici lungo il profilo 6N. Le distanze orizzontali si riferiscono alla posizione del campione topograficamente più alto.

Dopo questi ultimi campionamenti, data la forte diluizione del sedimento colorato, si decideva di terminare il monitoraggio dei traccianti.

Tenendo conto che la profondità di mixing è risultata mediamente di 8 cm si sono potute calcolare le percentuali di recupero dei due traccianti (%RT):

$$\%RT = \frac{\sum (S \times N) \times (k h)}{N_{tot}} \times 100$$

Dove: S = superficie compresa tra due curve di isoconcentrazione del tracciante;

N = numero di traccianti per ogni superficie di isoconcentrazione;

k = variabile che tiene conto della diminuzione della concentrazione di tracciante con la profondità (nel nostro caso k = 0.3, assumendo una sezione triangolare del cuneo di sedimento rimobilizzato);

h = profondità di mixing;

N_{tot} = numero iniziale di granelli colorati.

Per il 4 aprile 2006 abbiamo un 80% di recupero per la sabbia verde ed un 85% per la ghiaia rossa. La mattina del 5 aprile scendono rispettivamente a 55% e 60%. Già dal pomeriggio dello stesso giorno si assiste ad un notevole calo che porta la percentuale di recupero del rosso a 20% mentre per il verde è circa del 30% rendendo i dati già poco affidabili (White, 1998).

Per quanto riguarda i volumi di sedimento trasportati, calcolati moltiplicando la velocità del centro di massa per la sezione di mixing (Fig. 12 e Tab. 1), abbiamo che durante il primo giorno, con onde provenienti da nord, si ha un trasporto di $1.8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}$, mentre il giorno successivo, con onde da sud, scende a $7.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$.

Analisi granulometriche e modello di McLaren

Per un'analisi dei dati che permetta di descrivere in forma esaustiva le caratteristiche delle popolazioni granulometriche, si sono scelti come parametri la media, il D_{50} , la deviazione standard ed il coefficiente di Skewness.

I risultati delle analisi granulometriche indicano una mediana (D_{50}) dominante corrispondente ad un materiale che va dalla sabbia grossolana alla ghiaia. Nella parte alta della spiaggia questa tende a diminuire il suo diametro se la si confronta con quella della battigia.

Per quanto riguarda la classazione si nota come spostandosi verso nord questa tenda a diminuire.

Dopo un'attenta analisi e numerose prove si è deciso che per spiaggia in questione può essere utilizzata la casistica numero 3 del modello di McLaren, ovvero quella in cui:

$$\text{CASO 3} \quad \sigma_2^2 > \sigma_1^2, \mu_2 < \mu_1, Sk_2 > Sk_1$$

Per quanto riguarda la maglia della griglia utilizzata per l'applicazione del metodo, si sono scelti 100 m, poiché, trovandoci su un tratto di costa lungo e stretto, è necessario che anche il valore dei punti situati su profili più lontani influisca su quello del punto preso in considerazione dal modello.

Analizzando la Figura 16, cioè quella relativa ai rilievi svolti il 6 aprile 2006, si nota una forte analogia con i dati ottenuti dai traccianti fluorescenti. Nel dettaglio si riescono a distinguere due direzioni principali di trasporto, una verso mare nella zona più a sud, e l'altra verso nord, con una zona di separazione del trasporto localizzata a 4808350 N.

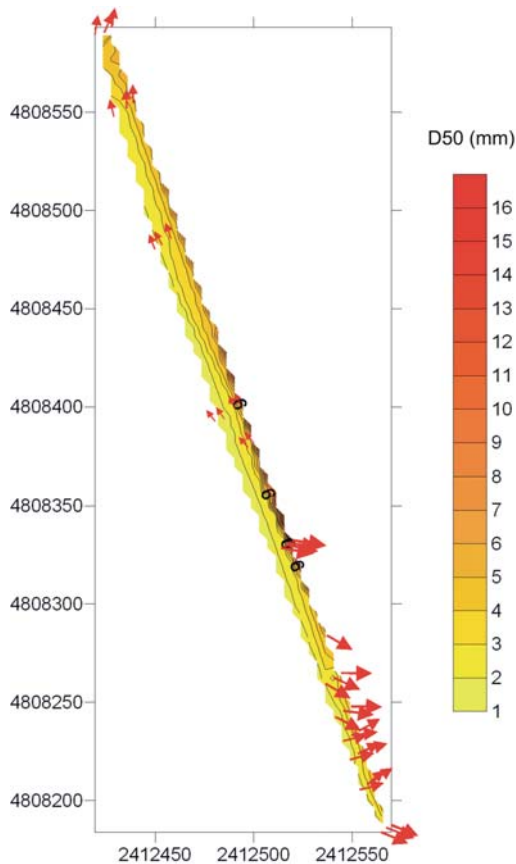


Figura 16 - Modello di McLaren basato sulle granulometrie del 6 aprile 2006.

Confrontando questi risultati con quelli dello studio effettuato da Nordstrom e Jackson (1993) su un'altra spiaggia di tipo misto negli Stati Uniti, si nota come anche in quella situazione si sia riscontrato un trasporto differenziato in base alla granulometria, con selezione del sedimento ortogonamente al profilo di spiaggia.

Da notare però la differenza sostanziale tra i due esperimenti per quello che riguarda le condizioni meteorologiche, che nel caso presente sono state di alta energia, mentre in quello statunitense erano di bassa. Per quanto riguarda il nostro caso, abbiamo notato come le frazioni più grossolane si siano spostate verso profondità maggiori, mentre sulla spiaggia si depositavano le più fini. Al contrario di quello notato durante l'esperimento oggetto del presente studio, gli autori precedenti identificavano accumulo di materiale ghiaioso/ciottoloso sulla spiaggia emersa.

Conclusioni

Lo studio presentato in questo lavoro si è concentrato sulle dinamiche di trasporto sedimentario su una spiaggia di tipo riflettente, costituita da sabbie grossolane e ghiaie fini di composizione carbonatica. Si sono utilizzati traccianti fluorescenti tramite analisi della dispersione *in-situ*, utilizzando un sistema di analisi delle immagini appositamente progettato.

Attraverso gli studi realizzati tramite traccianti fluorescenti si è potuto dimostrare come in condizioni di alta energia del moto ondoso la frazione ghiaiosa si deposita alla base della battigia, mentre la sabbia viene spostata verso la parte più alta della spiaggia.

Lo studio quantitativo attraverso traccianti è stato confrontato con un'analisi degli assi di transito sedimentario tramite metodi di dispersione statistica basati sul calcolo dei vettori residuali di trasporto. Si rammenta che di per sé quest'ultima metodologia può produrre risultati difficilmente interpretabili e non è esente da critiche nell'ambito della letteratura internazionale (Masselink, 1992; Roux, 1994). In occasione dello studio sperimentale oggetto del presente lavoro si è provato a confrontare le osservazioni dirette di trasporto con i vettori di dispersione e si può concludere che il metodo può fornire informazioni accettabili da un punto di vista qualitativo.

La parte finale dell'esperimento è stata caratterizzata da un livello decrescente di energia del moto ondoso ma purtroppo la diluizione del tracciante non ha permesso di ottenere informazioni di tipo quantitativo. Si è però osservato che al decrescere dell'energia dei frangenti la frazione ciottolosa, non studiata in questa occasione, tende a riapparire sulla spiaggia. La futura sperimentazione si concentrerà nell'inclusione di tale frazione grossolana nello studio del trasporto sedimentario.

Ringraziamenti

Il lavoro descritto in questa memoria è stato finanziato attraverso i fondi CADSEALAND della Regione Marche.

Si ringraziano la dott.ssa Clara Armaroli, la dott.ssa Manuela Gardelli, gli studenti Andrea Alessandrini e Francesco Bassano dell'Università di Camerino per la preziosa collaborazione durante le fasi di monitoraggio in loco.

Si esprime un caloroso ringraziamento agli ingegneri Cinzia Montironi, Giorgio Filomena e Vincenzo Marzialetti della Regione Marche per il fondamentale appoggio durante tutte le fasi dell'esperimento.

Bibliografia

- Anfuso G. (2005) - *Sediment-activation depth values for gentle and steep beaches*. Marine Geology, 220: 101-112.
- Chapman D.M. e Smith A.W. (1977) - *Methodology of a large scale sand tracer experiment*. Proceedings of 3rd Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering, Melbourne, Australia, pp. 185-189.
- Ciavola P., Taborda R., Ferreira Ó. e Dias J.M.A. (1997a) - *Field measurements of longshore sand transport and control processes on a steep meso-tidal beach in Portugal*. Journal of Coastal Research, 13: 1119-1129.
- Ciavola P., Taborda R., Ferreira Ó. e Alveirinho Dias, J. (1997b) - *Field observations of sand-mixing depths on steep beaches*. Marine Geology, 141: 147-156.
- Ciavola P., Dias N., Ferreira Ó., Taborda R. e Dias J.M.A. (1998) - *Fluorescent sands for measurements of longshore transport rates: a case study from Praia de Faro in southern Portugal*. Geo-Marine Letters, 18: 49-57.
- Ciavola P., Billi P., Armaroli C., Preciso E., Salemi E. e Balouin, Y. (2005) - *Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo*. Geologia Tecnica ed Ambientale, 2005 (1): 41-57.
- Ciavola P., Nadalini F., Ardone V. (2006) - *Depth of sand activation on protected and non-protected nourished beaches: a laboratory study in a large-scale wave flume*. Proceedings of Coastal Dynamics 2005, ASCE, New York, USA.

- Ekwurzel B. (1988) - *The sediment dynamics of a meso-tidal, mixed sand and gravel, bayside beach: Herring Cove, Cape Cod, MA*. Tesi non pubblicata. Dipartimento di Geologia, Rutgers University, New Brunswick, NJ. 193 pp.
- Eliot I.G. e Clarke D.J. (1988) - *Semi-diurnal variation in beachface aggradation and degradation*. Marine Geology, 79: 1-22.
- Ferreira O., Ciavola P., Taborda R., Bairros M. e Dias J.M.A. (2000) - *Sediment mixing depth determination for steep and gentle foreshores*. Journal of Coastal Research, 16: 830-839.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journal of Sedimentary Petrology, 27: 3-26.
- Gao S. e Collins M. (1991) - *A critique of the "McLaren method for defining sediment transport paths - Discussion*. Journal of Sedimentary Petrology, 61 (1): 143-146.
- Gao S. e Collins M. (1992) - *Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"*. Sedimentary Geology, 80: 47-60.
- Greenwood B. e Hale P.B. (1980) - *Depth of activity, sediment flux and morphological change in a barred beach environment*. The Coastline of Canada., S.B. McCann (ed.). Geological Survey of Canada, pp. 89-109.
- Gonzales R., Ciavola P., Corbau C., Falati S. e Ferreira Ó. (2004) - *Mixing depth experiments on an estuarine beach; St. Georges Beach, Gironde (France)*. Special Issue of Journal of Coastal Research, SI41: 43-52.
- Ingle J.C. (1966) - *The Movement of Beach Sand*. Elsevier Publishing, Amsterdam. pp. 221.
- Komar P. e Inman D. (1970) - *Longshore sand transport on beaches*. Journal of Geophysical Research, 75: 5514-5527.
- Kraus N.C., Isobe I., Igarashi H., Sasaki T.O. e Horikawa K. (1982) - *Field experiments on longshore sand transport in the surf zone*. Proceedings of the 18th International Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 969-988.
- Kraus N.C. (1985) - *Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone*. Journal of Sedimentary Petrology, 55: 3-14.
- Lanckneus J., De Moor G., De Schaepmeester G., Meyus I. e Spiers V. (1992) - *Residual sediment transport directions on a tidal sand bank*. In: Bulletin de la Soc. Belge d'Etudes Géog., SOBEG, pp. 425-445.
- Masselink G. (1992) - *Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhone delta, Southern France: a test of the "McLaren Model"*. Journal of Coastal Research, 8 (2): 286-291.
- McLaren P. (1981) - *An interpretation of trends in grain size measurements*. Journal of Sedimentary Petrology, 51 (2): 611-624.
- McLaren P. e Bowles D. (1985) - *The effects of sediment transport on grain-size distributions*. Journal of Sedimentary Petrology, 55 (4): 457-470.
- Nordstrom K.F. e Jackson N.L. (1993) - *Distribution of surface pebbles with changes in wave energy on a sandy estuarine beach*. Journal of Sedimentary Petrology, 63 (6): 1152-1159.
- Pedrerros R., Howa H.L. e Michel D. (1996) - *Applications of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas*. Marine Geology, 135: 35-49.
- Roux J.P. (1994) - *Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors" - comment*. Sedimentary Geology, 90: 153-156.
- Russell R.C.H. (1960) - *Use of fluorescent tracers for the measurement of littoral drift*. Proceedings of the 7th International Coastal Engineering Conference ASCE, pp. 419-444.
- Taborda R., Ferreira Ó., Dias J.M.A. e Moita P. (1994) - *Field observations of longshore sand transport in a high energy environment*. In: de Carvalho S. and Gomes V., (eds), Proceedings of Littoral 94. Lisbon, Portugal: EUROCOAST Portugal, pp. 479-487.
- Tonk A. e Masselink. G. (2005) - *Evaluation of longshore transport equation with OBS sensor, streamer traps and fluorescent tracers*. Journal of Coastal Research, 21: 915-931.
- U.S. Army Corps of Engineers (2006). Coastal Engineering Manual, Parte II, Capitolo 4. Surf Zone Hydrodynamics. EM 1110-2-1100.
- Vila-Concejo A., Ferreira O., Ciavola P., Taborda R. e Dias J.M.A. (2003) - *Qualitative and quantitative analyses of tracer data: straight beaches, inlets and harbours*. Proceedings of the International Conference on Coastal Sediments 2003. CD-ROM Published by World Scientific Publishing Corp. and East Meets West Productions, Corpus Christi, Texas, USA. ISBN 981-238-422-7.

- Vila-Concejo A., Ferreira O., Ciavola P., Taborda R. e Dias J.M.A. (2004) - *Tracer studies on the updrift margin of a complex inlet system*. Marine Geology, 208: 43-72.
- White T.E. (1998) - *Status of measurement techniques for coastal sediment transport*. Coastal Engineering 35: 17-45.
- Wright L.D. e Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis*. Marine Geology, 56: 93-118.
- www.autoritabacino.marche.it
- Yasso W.E. (1966) - *Formulation and use of fluorescent tracers coatings in sediment transport studies*. Sedimentology, 6: 287-301.
- Zenkovitch V.P. (1960) - *Fluorescent substances as tracers for studying the movements of sand on the sea bed*. The Dock and Harbour Authority XL: 280-283.

Ricevuto il 22/02/2007, accettato il 29/05/2007.

Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano

Manuela Gardelli, Simone Caleffi e Paolo Ciavola

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara, via Saragat, 1 - 44100 Ferrara

Riassunto

Il presente lavoro riguarda l'evoluzione morfodinamica della foce di un piccolo corso d'acqua in alto Adriatico (Torrente Bevano), attraverso uno studio a lungo e medio termine della foce "naturale" fino al 2005, ed il monitoraggio iniziale della foce attuale, aperta artificialmente ad inizio 2006. La vecchia foce presentava dinamiche particolari essendo una delle poche, nell'ambiente costiero emiliano-romagnolo, non regimentata da argini artificiali e dunque libera di seguire un'evoluzione naturale. Gli autori ritengono che possa essere assimilata ad un piccolo *tidal inlet*. La sua evoluzione è stata esaminata sia mediante fotointerpretazione su un periodo di 9 anni (1996-2005), sia con 8 campagne di rilievi topografici tra aprile 2003 e ottobre 2004. Quest'ultimo studio, completato da una ricostruzione del clima meteomarinico antistante la zona e da una classificazione delle mareggiate negli anni 2003 e 2004, ha verificato le dinamiche di foce già individuate da studi precedenti: in particolare, l'effetto combinato di moto ondoso da S-E e maree sizigiali, che producono un trasporto lungo costa diretto verso nord e la migrazione della freccia litorale in tale direzione, con conseguente restringimento della sezione di foce, erosione delle dune a nord ed ingressione di acque marine nella pineta retrostante. Queste problematiche hanno spinto la Regione Emilia-Romagna ad effettuare, ad inizio 2006, un intervento di chiusura della vecchia foce e di apertura della foce attuale circa 500 m più a sud. Dalle prime fasi del monitoraggio, si osserva già a pochi mesi dall'apertura della nuova bocca la riformazione della freccia litorale a sud che migrando verso nord va a restringere il canale di foce e produce interrimento dello stesso. Studi futuri monitoreranno tale evoluzione anche in condizioni estreme di onde e maree, per poter così valutare se il sedimento depositato verrà mobilitato con le stesse dinamiche della vecchia foce oppure se il trasporto lungo costa subirà una riduzione evidente in mancanza dell'input sedimentario prodotto dall'erosione delle dune.

Parole chiave: *tidal inlet*, fotointerpretazione, mareggiate, rilievi topografici, Emilia-Romagna.

Abstract

The present paper describes the morphodynamic evolution of the mouth of a small river in the northern Adriatic (Bevano River). A medium to long-term study of the natural system was undertaken using data up to 2005; thereafter the river mouth was deflected by local authorities by opening a new inlet at the beginning of 2006. The old mouth had a peculiar behaviour since it was not delimited by artificial embankments and was able to evolve in a natural manner, comparable to a small tidal inlet. Its evolution was studied using 9 sets of aerial photographs (1996-2005) and 8 direct topographic surveys (April 2003-October 2004). The direct monitoring activities were integrated by a study of the concomitant wave climate, including the study of storm events. These results have confirmed the hypothesis proposed by previous studies that the northward migration of the inlet is controlled by the joint action of SE waves and Spring Tides. These generated a net northward sediment transport with maintenance of the inlet's channel that was however narrowed and deepened. The process was associated with lateral dune erosion and flooding of a coastal pine forest that stretches behind the system. Local author-

ities performed in 2006 a management policy for the river mouth, closing the old one and opening a new one 500 m further southwards. The monitoring of the new mouth indicates that a few months after the works the process of northward migration of the southern bank of the mouth is already taking place, with formation of a spit that tends to occlude the channel's inlet. Future research activities will concentrate on the behaviour of the system under storm events to evaluate if sediment transport patterns are comparable to the old inlet. Further investigations will also study the role of the decreased dune erosion on the nearshore budget.

Keywords: *tidal inlet, aerial photography, storm events, topographic and bathymetric surveys, Emilia-Romagna.*

Premessa

La zona della foce del Torrente Bevano (Fig. 1) ha una grandissima importanza dal punto di vista ecologico-paesaggistico in quanto rappresenta un ambiente ormai unico lungo tutta la costa emiliano-romagnola, essendo uno dei pochissimi tratti non fortemente antropizzati del litorale ed in cui sia ancora riconoscibile l'originaria successione di ambienti sedimentari costieri, dalla battigia fino alle zone palustri di acqua dolce. Questo tratto di costa condivide con il resto del sistema costiero emiliano-romagnolo un insieme complesso di problematiche, che vanno dall'eutrofizzazione dovuta agli apporti di nutrienti dai corsi d'acqua, alla dinamica dei sedimenti fluviali e costieri, all'azione degli ecosistemi nel paesaggio costiero e nell'entroterra, agli aspetti economici, infrastrutturali ed insediativi (Regione Emilia-Romagna, 2003).

Fino alla fine del 2005 la zona presentava dinamiche di foce particolari, in quanto non era regimentata da argini artificiali e rimaneva libera di seguire un'evoluzione del tutto naturale. Per questi motivi è ancora oggi protetta con numerosi vincoli a tutela di flora e fauna facendo parte della riserva naturale del Parco del Delta del Po. Gli autori ritengono che l'intera zona possa essere assimilabile ad un piccolo *tidal inlet*. In realtà, secondo Davis e FitzGerald (2004), un *tidal inlet* è nello specifico un'apertura nella linea di costa tra 2 sistemi di barriere (Davis e Barnard, 2003) o tra una barriera ed un'adiacente costa rocciosa (FitzGerald et al., 2002). La zona di foce del T. Bevano si è formata a causa della migrazione verso nord del canale del torrente e non sono presenti ambienti peculiari di retro-barriera direttamente collegati ad essa. Sono però presenti una freccia litorale a sud che migra verso nord ed è andata ripetutamente nel tempo ad ostruire la bocca di foce, una barra di battigia (*swash bar*), forma particolare di barra intertidale (Balouin et al., 2003) che si crea nel lato sottocorrente, ed un delta di fronte alla foce che dipende dalle correnti tidali.

I *tidal inlets* vengono generalmente classificati in base alla dominanza delle correnti tidali, del moto ondoso oppure in condizioni di energia mista (Davis e Hayes, 1984; Davis e FitzGerald, 2004). La zona di studio è influenzata dall'azione combinata delle correnti di marea e del moto ondoso (Balouin et al., 2006b): il sedimento che si deposita alla foce può essere assimilato ad un delta di riflusso (*ebb-tidal delta*), ma di dimensioni molto piccole e senza le barre lineari che si formano ai margini del canale di foce perpendicolari alla linea di riva (Davis e FitzGerald, 2004). Questa morfologia è tipica dei delta dominati dalle correnti tidali. La freccia litorale a sud della bocca di foce però, è condizionata dalla corrente lungo costa: migra infatti verso nord e va ad ostruire la bocca di foce, anche se non la chiude mai completamente, come accade per esempio nell'*inlet* studiato da Conley (1999), perché stagionalmente influenzata anche dagli eventi di piena. Recenti studi effettuati sulle variazioni morfodinamiche della foce (Ciavola et al., 2005; Balouin et al., 2006b), hanno infatti messo in evidenza il continuo e rapido movimento verso nord della freccia litorale e di tutta la bocca di foce, con conseguente erosione della duna ed ingressione di acque marine nella pineta e nei terreni retrostanti.

Il presente lavoro prende in esame l'evoluzione a lungo termine della foce dal 1996 al 2005 utilizzando fonti aereofotogrammetriche, e l'evoluzione a medio termine attraverso l'analisi dei dati acquisiti con una serie di campagne di rilievo concentrate tra aprile 2003 e ottobre 2004, cercando di definirne le dinamiche naturali. Ad inizio 2006, la Regione Emilia-Romagna (tramite il Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, sede di Ravenna) ha eseguito i lavori di riqualificazione funzionale del tratto costiero in corrispondenza della foce, tramite chiusura della vecchia foce ed apertura di una nuova bocca circa 500 m più a sud, con un'ulteriore uscita parziale (scolmatore) alla quota del medio mare, localizzata a sud per altri circa 400 m (Regione Emilia-Romagna, 2003; Fig. 2). La fase iniziale del monitoraggio della nuova foce, effettuato con rilievi topobattimetrici e prelievo di campioni sia sulla spiaggia emersa, sia nel tratto pre-foce, sia sulla spiaggia sommersa, è stata eseguita dagli autori che presentano in questo lavoro i risultati raccolti fino all'estate del 2006. Tale monitoraggio è ancora in corso.

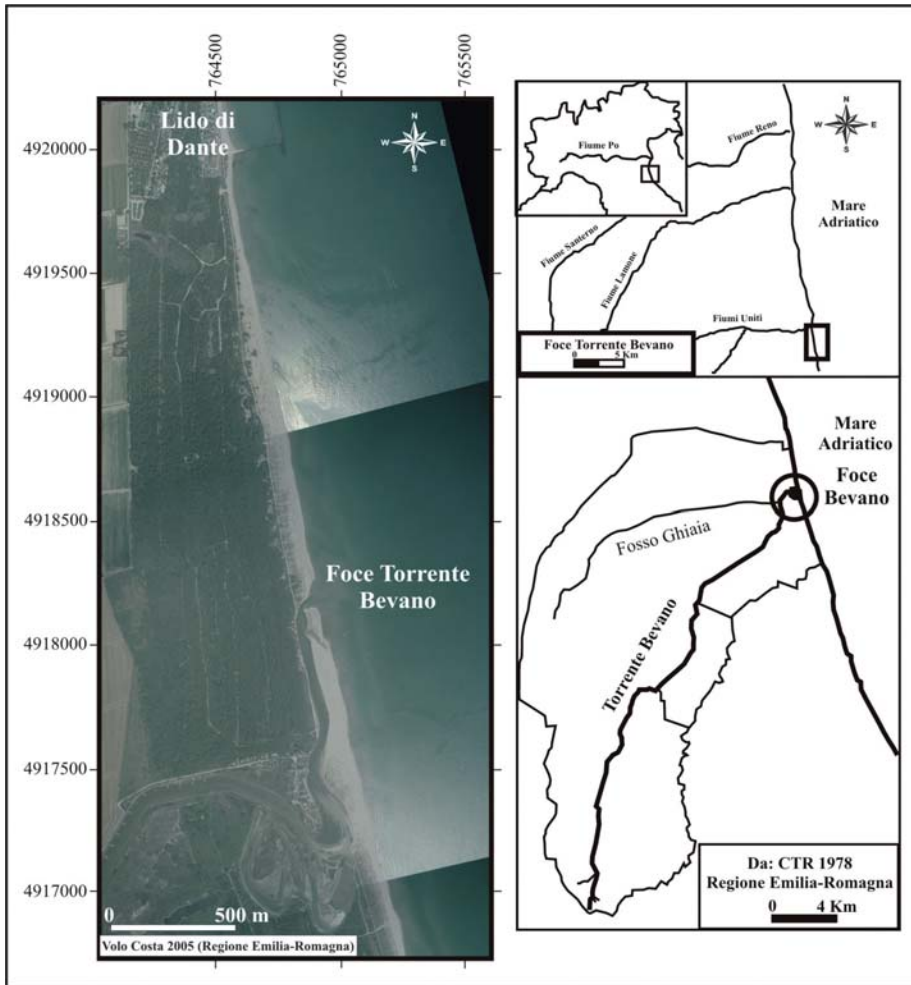


Figura 1 - Inquadramento geografico dell'area di studio. A sinistra, particolare della foce del Torrente Bevano (Volo Costa 2005, Regione Emilia-Romagna); in basso a destra, schematizzazione del bacino idrografico. Sistema di coordinate UTM32 ED50.

Geomorfologia della zona di studio

Il Torrente Bevano ha origine dai versanti collinari ad est di Bertinoro in provincia di Forlì-Cesena, scorre in direzione nord-est e, dopo un percorso di circa 17 km, entra in provincia di Ravenna dove attraversa da ovest ad est la pianura ravennate per altri 18 km, sfociando in Mar Adriatico nell'area antistante la Pineta di Classe, fra le località di Lido di Classe e Lido di Dante (Fig. 1).

Il bacino idrografico ha un'estensione di circa 92 km² (suddiviso in 12 sottobacini quasi tutti di pianura), con una classica forma ad anfiteatro, consistente in colline plioceniche con versanti a morfologia dolce tipica dei rilievi a componente prevalentemente argilloso-marnosa. Nella zona di pianura il corso d'acqua scorre in ghiaie, sabbie ed argille alluvionali dell'Olocene ed il materiale di fondo è di natura limoso-argillosa, con poche sabbie. Il canale ha una conformazione rettilinea, ma il tratto terminale pre-fociale è caratterizzato da una morfologia meandriforme che ha portato, nel corso di questo secolo, alla formazione ed al successivo abbandono di varie anse a ridosso della spiaggia (Ciavola et al., 2005).

Il T. Bevano riceve numerosissime immissioni da fossi e canali di scolo, il principale dei quali è il Canale Fosso Ghiaia (Fig. 1), che si immette nel T. Bevano ad una distanza di circa 2 km dalla foce. Gli altri affluenti sono costituiti da piccoli scoli consorziali delle aree agricole-industriali del ravennate che, data la limitata portata liquida e l'assenza di apporto di sedimenti, influenzano poco la dinamica evolutiva dell'alveo e della sua foce. Il bacino si presenta con una forma allungata lungo la direzione dell'asta principale,

con rapporto di allungamento Re (rapporto tra il diametro di un cerchio di area uguale a quella del bacino e la lunghezza massima del bacino misurata lungo l'asta principale) pari a 0.6 (Ciavola et al., 2005). Balouin et al. (2006b) hanno dimostrato che la foce fino al 2006 era fortemente influenzata dagli agenti meteorologici, in particolare dalle correnti di marea che, in condizioni sizigiali e grazie anche al trasporto litorale lungo costa, erano in grado di spingere la bocca verso nord e di trasportare all'esterno il materiale eroso nella parte del cordone dunare interna alla foce, incrementando così il budget sedimentario della spiaggia a nord. Questo tratto di spiaggia presenta un cordone di dune sulla spiaggia emersa ed una linea di barre sulla spiaggia sommersa, le cui evoluzioni sono state descritte rispettivamente da Balouin et al. (2006a) e da Armaroli et al. (2005), attraverso studi delle variazioni a medio e lungo termine effettuati utilizzando fotointerpretazione ed analisi di immagini video (ARGUS). Le dune risultano in arretramento nella zona immediatamente a ridosso delle strutture di protezione a Lido di Dante, mentre rimangono abbastanza stabili più a sud, nei pressi della vecchia foce.

Metodi di studio

Variazioni morfologiche

Per lo studio a lungo termine (9 anni) dell'evoluzione geomorfologica della zona sono state utilizzate ortofoto digitali, un'immagine satellitare QuickBird ed un volo LIDAR terrestre (dati forniti dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna). Su tali supporti sono stati digitalizzati in ambiente GIS il tratto terminale pre-fociale del canale del T. Bevano e le linee di riva immediatamente a nord e a sud della zona di foce.

Lo studio evolutivo a medio termine (19 mesi) è stato realizzato attraverso un monitoraggio della zona di foce articolato in 8 campagne di rilevamento topografico, effettuate con Stazione Totale dall'aprile del 2003 all'ottobre del 2004. Da notare che tale periodo comprende anche la campagna intensiva svolta da Balouin et al. (2006b) dal 14 aprile al 20 giugno 2003, per studiare la dispersione dei sedimenti di foce tramite il metodo delle sabbie traccianti.

In previsione dei lavori di chiusura della vecchia foce e di apertura della nuova, è stato svolto dalla Regione Emilia-Romagna un rilievo topobatimetrico pre-lavori (17 dicembre 2005) rilevando l'asta terminale del torrente e vari profili distanziati di circa 20 m l'uno dall'altro fino a 3 m di profondità sulla spiaggia sommersa. A fine lavori, lo stesso ente faceva eseguire un nuovo rilievo batimetrico il 21 aprile 2006 ed un rilievo topografico a fine maggio 2006.

La fase iniziale del monitoraggio della zona della nuova foce (Fig. 2) è stata eseguita attraverso rilievi topobatimetrici a fine giugno (21-28 giugno) e a fine agosto 2006 (29 agosto-5 settembre): la topografia è stata rilevata tramite sistema DGPS con correzione RTK, mentre le batimetrie sono state effettuate utilizzando un ecoscandaglio a singola frequenza interfacciato con un sistema DGPS con correzione differenziale submetrica OMNISTAR.



Figura 2 - Schematizzazione della posizione della nuova foce del T. Bevano, ricavata dal rilievo batimetrico del 21 aprile 2006 (base di riferimento: Volo Costa 2005, Regione Emilia-Romagna). Per "Zona Scolmatore" si intende un tratto di spiaggia con quota di fondo al medio mare, posizionata all'altezza dell'ultimo meandro.

Prendendo come riferimento il rilievo di dicembre 2005, sono state inquadrate 10 sezioni perpendicolari alla linea di riva, distanziate tra loro di circa 100 m: quattro a sud della nuova foce e 6 a nord, numerate da 1 a 10 da nord verso sud (Fig. 3). Lungo tali sezioni sono stati eseguiti i rilievi topografici ed i rilievi batimetrici della spiaggia sommersa e del tratto terminale del canale della nuova foce.

Campionamenti ed analisi granulometriche

Sono stati effettuati dagli autori dei campionamenti nel tratto terminale della vecchia foce, della spiaggia emersa e della battigia, rispettivamente il 6 febbraio, il 7 febbraio ed il 16 maggio 2006. I campionamenti avvenivano lungo i 10 profili stabiliti (Fig. 3), tramite raccolta di campioni di superficie e bennate da piccola imbarcazione. I prelievi di campioni superficiali di sabbia sono stati eseguiti sul retro-duna, sulla cresta duna, sul piede duna, sulla battigia e ad una profondità di 1 m (6 febbraio 2006). Sei sezioni sono state poi prolungate anche dentro l'asta terminale della vecchia foce, con prelievo di campioni tramite una piccola benna, sulla riva destra, al centro e sulla riva sinistra (7 febbraio 2006). Il campionamento della spiaggia sommersa è stato eseguito in un secondo momento (16 maggio 2006), poiché l'ubicazione dei campioni richiedeva un inquadramento batimetrico recente. Sulla base della batimetria effettuata il 21 aprile, tramite uso di una benna sono stati prelevati campioni lungo i transetti del 7 febbraio, bennando il truogolo, la cresta ed il piede della barra sommersa a circa 3 m di profondità. Una volta raccolti tutti i campioni, sono state effettuate in laboratorio le analisi granulometriche. Nel caso in esame è stata impiegata la tecnica di setacciatura a secco solo per pulire il campione dai frammenti di bioclasti: in primo luogo perché la granulometria delle sabbie della spiaggia alla foce del T. Bevano è in generale medio-fine, in secondo luogo perché la tecnica a secco non permette di calcolare i diametri delle particelle immerse in un mezzo, per cui si è preferito adottare un metodo di analisi che avesse valenza idraulica.

Per l'analisi vera e propria si è utilizzata una bilancia di sedimentazione di tipo standard che misura la velocità di deposizione dei grani secondo la legge di Stokes. Per quanto riguarda invece l'analisi della frazione fangosa (da 63 a 0.49 micron), è stato utilizzato un sedigrafo a raggi X della Micromeritics, che fa anch'esso riferimento alla legge di Stokes. Una volta conosciuta la distribuzione granulometrica si è proceduto alla costruzione delle curve di frequenza e delle curve cumulative derivate. Il "Metodo grafico" di Folk e Ward (1957) è stato utilizzato per calcolare il diametro medio (Mz), la classazione o Sorting (s_i) ed il coefficiente di Skewness (sk_i).

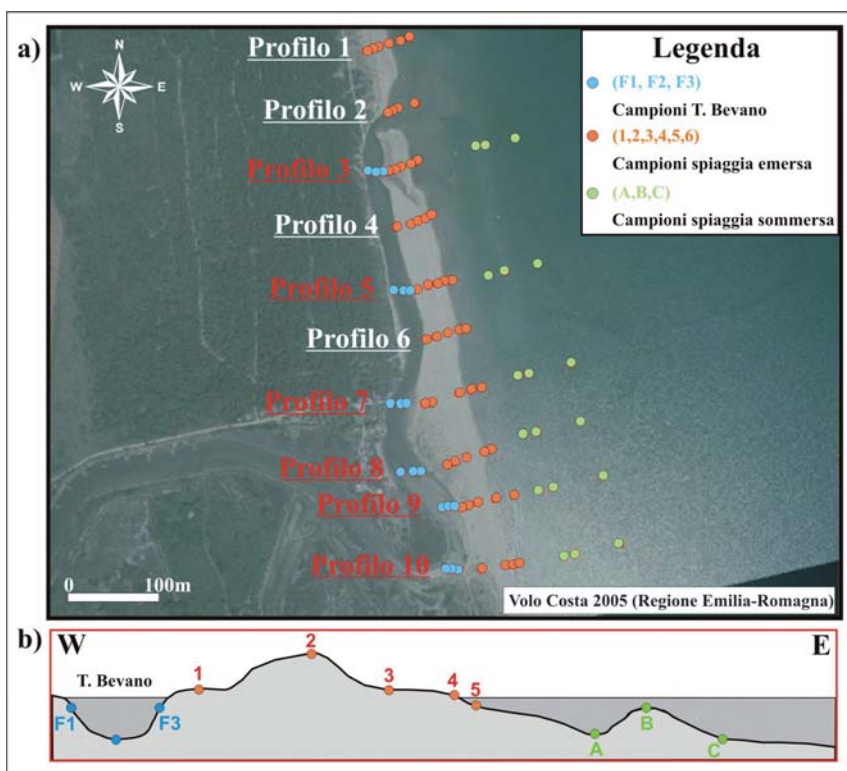


Figura 3 - a) ubicazione e denominazione dei profili stabiliti per il monitoraggio della nuova foce del T. Bevano (basata su: Volo Costa 2005, Regione Emilia-Romagna) ed i relativi punti di campionamento. In rosso sono indicate le sezioni prolungate sia nel fiume sia sulla spiaggia sommersa; b) schematizzazione della posizione dei punti di prelievo dei campioni lungo i profili.

Clima meteomarinò

E' stato analizzato il clima meteomarinò antistante la zona di studio, utilizzando i dati delle boe ondametrichè della Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.). Sono stati esaminati sia i dati ondametrichè della boa di Punta della Maestra (boa del Nord Adriatico posta di fronte alla foce del Fiume Po), sia quelli della boa di Ancona (boa dell'Adriatico Centrale posizionata di fronte ad Ancona). La boa piú vicina è quella di Punta della Maestra, ma da dicembre 2004 non sono piú reperibili i dati, a causa della rimozione della stessa per mal funzionamento. In questa stazione inoltre, i dati si riferiscono a soli due anni (2003 e 2004), periodo troppo breve per elaborare un clima annuo medio di buona significatività.

Il data-set della boa di Ancona copre invece un periodo che va dalla seconda metà di marzo 1999 alla prima metà di marzo 2006. Tale boa è però situata circa 200 km a sud del sito di studio, per cui si è deciso di trasportare a Ravenna i dati registrati in questa stazione. E' stato quindi utilizzato il criterio di trasposizione basato sulla similitudine tra i *fetch* efficaci. L'ipotesi che viene fatta a priori è che gli stessi eventi meteomarini si verifichino sulle due zone, Ancona e Ravenna, e che le differenze nel moto ondoso siano attribuibili alle diversità tra i *fetch* geografici disponibili per la generazione del moto ondoso. Il *fetch* geografico è la lunghezza, per una direzione fissata, del tratto di mare sul quale le onde nascono per interazione con il vento. Il suo valore massimo, in zone chiuse come quella del Mediterraneo, non viene mai preso in considerazione in misura superiore ai 600 km (Corsini e Inghilesi, 2004). Per stimare, oltre che l'estensione lungo una direzione specifica, anche gli effetti delle porzioni di mare adiacenti a quella considerata, e quindi per valutare gli effetti della "larghezza" della zona di generazione oltre a quelli della "lunghezza", viene introdotto il concetto di *fetch* efficace. Il calcolo del *fetch* efficace lungo una direzione è quindi influenzato dalle lunghezze dei *fetch* geografici nelle direzioni circostanti. Utilizzando il metodo SMB (Sverdrup and Munk, 1947) con i successivi aggiornamenti (Saville, 1954; Seymour, 1977; CERC, 1984), la lunghezza $F_{eff}(\theta_j)$ associata alla direzione del vento θ_j , è calcolata come media ponderale delle lunghezze F_i (geografiche), incluse in un settore angolare pari a 180°, con la formula (1):

$$F_{eff}(\theta_j) = \frac{\sum_{i=J-90}^{j+90} F_i \cos^{n+1}(\theta_i - \theta_j)}{\sum_{i=J-90}^{j+90} \cos^n(\theta_i - \theta_j)} \tag{1}$$

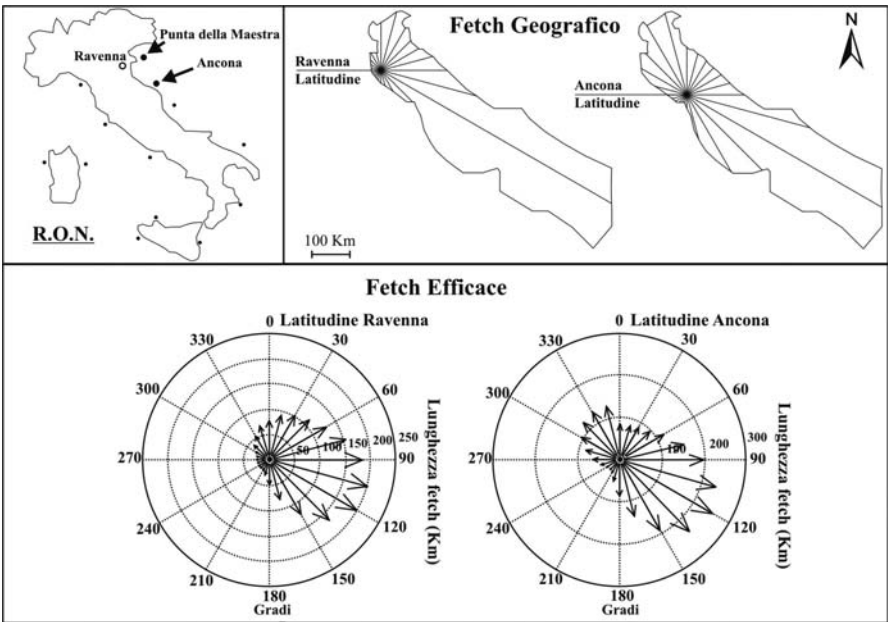


Figura 4 - In alto: schematizzazione dei confini del Mare Adriatico e rappresentazione del *fetch* geografico alla latitudine di Ravenna e della boa ondametrica di Ancona; in basso: *fetch* efficace alla latitudine di Ravenna e della boa di Ancona, settori in gradi N e distanze in km.

in cui n è un esponente legato alla legge di distribuzione direzionale dell'energia del moto ondoso, generalmente posto uguale a 2. Le lunghezze dei fetch geografici (Fig. 4) su cui trasporre il moto ondoso, sono state calcolate per un punto alle coordinate geografiche di 44° 25' N - 12° 38' E, corrispondente sulle carte nautiche (carta nautica n° 37 del Mare Adriatico "Da Pesaro al Po di Goro", Istituto Idrografico della Marina, 5a edizione, scala 1:100000, aggiornata a luglio 1999) alla profondità di 30 metri.

Il criterio di trasposizione basato sulla similitudine tra i *fetch* efficaci, lasciando invariata la direzione di provenienza del moto ondoso, restituisce un nuovo valore di periodo d'onda T e di altezza H secondo le proporzioni sotto indicate:

$H_{Ravenna} = [F_{eff:Ravenna} / F_{eff:Ancona}]^{1/2} * H_{Ancona}$	(2)
$T_{Ravenna} = [F_{eff:Ravenna} / F_{eff:Ancona}]^{1/2} * T_{Ancona}$	(3)

Una volta che i dati raccolti dalla boa di Ancona sono stati trasposti a Ravenna, sono stati analizzati per determinare le principali mareggiate: queste sono state identificate come eventi di moto ondoso con altezza minima di 1.5 m e con durata minima di 6 ore, considerando un tempo massimo di 12 ore per unire in un unico evento fenomeni ravvicinati (Mendoza e Jiménez, 2004). Si è considerata inoltre una variazione di direzione massima di 45° tra un dato di onda e l'altro (intervallo temporale di 30 minuti).

La densità di energia media (energia per unità di area orizzontale) costruita da ogni singola onda di altezza H è espressa da:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad [N \cdot m / m^2] \quad (4)$$

dove g è l'accelerazione di gravità e ρ è la densità dell'acqua.

Nel caso di un numero n di onde, l'espressione può esser generalizzata sfruttando la definizione di altezza quadratica media H_{rms}:

$$E = \frac{1}{8} \rho g \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i^2 = \frac{1}{8} \rho g \cdot H_{rms}^2 \quad [N \cdot m / m^2] \quad (5)$$

Nel caso di onde misurate da stati di mare reali, dallo spettro energetico viene ricavato il parametro di altezza d'onda significativa H_s, la cui relazione con H_{rms} è espressa da:

$$H_s = \sqrt{2} \cdot H_{rms} \quad (6)$$

la quale, sostituita nella formula (5) della densità di energia, trasforma l'espressione in:

$$E = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \quad [N \cdot m / m^2] \quad (7)$$

D'ora in poi, data la proporzionalità diretta tra densità di energia ed altezza d'onda al quadrato e volendo tenere in considerazione l'effetto delle onde nel tempo, per caratterizzare i fenomeni meteomarini di mareggiata, ci si riferirà al contenuto di densità di energia espresso dal parametro E* [m²hr], ottenuto dall'integrazione sull'asse del tempo dell'altezza significativa al quadrato:

$$E^* = \int_{t_1}^{t_2} H_s^2 dt \quad [m^2 \cdot hr] \quad (8)$$

dove t₁ e t₂ definiscono l'intervallo temporale (hr=ore) entro il quale H(t) > 1.5 m.

Una volta identificate le differenti mareggiate e calcolato il loro contenuto energetico, si è proceduto effettuando una divisione per classi di intensità. In questa caratterizzazione, scegliendo in base ad una miglior analogia di condizioni, viene sostituita la nota scala ricavata per eventi in oceano Atlantico (*Atlantic Coast Northeast Storms Intensity Scale*, vedi Dolan e Davis, 1992) con un'altra scala (Tab. 1), ricavata dall'osservazione di eventi meteomarini nel Mar Mediterraneo sulla costa di Barcellona, Spagna (Mendoza e Jiménez, 2004).

Si è considerata più appropriata la scala scelta in base all'intensità delle perturbazioni che mediamente colpiscono le coste del Mar Mediterraneo: i range più limitati della scala scelta caratterizzano meglio i fenomeni registrati, essendo questi mediamente di minor intensità rispetto a quelli che si verificano in oceano aperto.

Tabella 1 - Classi di mareggiate basate sul contenuto di densità di energia (Mendoza e Jiménez, 2004).

CLASSE	DENSITA' DI ENERGIA [m ² hr]
I debole	$E^* \leq 58.4$
II moderata	$58.4 < E^* \leq 127.9$
III significativa	$127.9 < E^* \leq 389.7$
IV intensa	$389.7 < E^* \leq 706.9$
V estrema	$E^* > 706.9$

Il regime tidale nel Nord Adriatico è fortemente asimmetrico con componenti diurne e semi-diurne; la massima escursione di marea è di 1.0 m in sizigie (Gambolati et al., 1998).

Per la correzione dei rilievi batimetrici durante il monitoraggio della nuova foce del T. Bevano è stato inoltre installato un trasduttore di pressione posizionato alla foce dei Fiumi Uniti, circa 2 km più a nord della zona studiata, riferendo successivamente i dati raccolti al livello del medio mare del mareografo di Porto Corsini.

Evoluzione morfodinamica della vecchia foce del T. Bevano

Studio a lungo termine (9 anni)

Per l'evoluzione della foce a lungo termine si è mappata la Linea di Alta Marea (*High Water Line – HWL*) che viene definita come l'intersezione tra la spiaggia ed il livello più alto raggiunto dall'acqua durante l'alta marea precedente il volo (Dolan e Hayden, 1983) e può essere facilmente individuata sia su immagini in bianco e nero sia su immagini a colori. La variazione della HWL, che corrisponde al limite tra sabbia asciutta e bagnata, dipende dalle condizioni meteomarine al momento del volo e dalle variazioni giornaliere e stagionali del ciclo tidale (Ciavola et al., 2004). Tale criterio di mappatura è stato adottato come standard a livello regionale in Emilia-Romagna per la fotointerpretazione costiera (Ciavola et al., 2003).

La Figura 5 mostra l'evoluzione della foce del T. Bevano dal 1996 al 2005, attraverso l'analisi della HWL digitalizzata con un programma GIS (Arcview) alla scala 1:3000, sulle seguenti basi di riferimento:

- volo AIMA del 1996 (CGR Parma), scala media 1:10000;
- volo IT2000 del 1998 (CGR Parma), scala media 1:10000;
- volo AGEA del 2002 (CGR Parma), scala media 1:10000;
- immagine satellitare QuickBird del 2003;
- volo LIDAR effettuato dall'Istituto Cartografico della Catalogna per conto del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna, tra settembre e ottobre 2004;
- volo Costa 2005 (CGR Parma), scala media 1:5000.

La bocca di foce dal 1996 in poi è sempre rivolta verso nord (Ciavola et al., 2005) e la sua migrazione in tale direzione continua anche negli anni successivi in modo molto evidente (Fig. 5). Nel 1996 si distingue la formazione di una freccia litorale a sud della bocca, che si prolunga verso nord nel 1998. Nel 1996 la sezione della bocca di foce è larga circa 50 m, che si restringe però a 20 m nel tratto chiuso dalla freccia litorale. Nel 1998, anche se la freccia continua a prolungarsi verso nord e si sposta verso mare di circa 20 m, si nota come tutta la bocca sia migrata nella stessa direzione di 130-150 m (70 m/anno), per cui la freccia litorale non restringe più la zona della bocca, che risulta essere larga quasi 80 m.

Dal 1998 al 2002 la foce si sposta ancora di altri 250 m verso nord (80 m/anno), ma l'estremità settentrionale della freccia litorale viene erosa notevolmente, in quanto l'asta terminale del canale di foce ruota verso est tanto da diventare quasi perpendicolare alla linea di riva, e viene mantenuta una sezione N-S ancora abbastanza larga (65-80 m). Nel 2003 la sezione trasversale dell'asta terminale diminuisce mentre la zona più esterna della bocca di foce ha un'ampiezza di circa 80 m e migra ancora verso nord di 100 m.

Nel 2004 la zona di foce cambia nuovamente la sua configurazione morfologica: tutto il tratto terminale del canale principale mostra una sezione N-S larga più di 100 m e si sposta verso nord l'ultima ansa che il fiume forma prima di sfociare in mare. Questa migrazione produce una grossa erosione delle dune a nord della foce ed in varie occasioni il mare raggiunge anche la pineta retrostante (Regione Emilia-Romagna, 2003).

Nel 2005, infine, la bocca di foce migra verso nord di altri 100 m: in particolare si sviluppa ancora la freccia litorale a sud che va a restringere nuovamente la sezione trasversale del canale.

Nel complesso quindi, la foce del T. Bevano è migrata verso nord di 500-600 m nei 9 anni presi in considerazione.



Figura 5 - Evoluzione della foce del T. Bevano dal 1996 al 2005 (base fotografica Volo Costa 2005, Regione Emilia-Romagna).

Questa veloce migrazione, ed in particolare l'evoluzione degli anni 2004 e 2005 con la distruzione di più di 150 m di dune e di parte della pineta, hanno indebolito il sistema di protezione naturale del territorio dalle mareggiate. Inoltre, nei periodi di magra la foce risentiva del trasporto di sabbia lungo costa interrandosi e rendendo molto difficoltoso lo sbocco a mare in caso di piena. La difficoltà dell'acqua di sfociare a mare si ripercuoteva a monte, facendo innalzare il livello dell'acqua nel fiume e rendendo più difficile lo scolo dei canali. In caso di grossa mareggiata il mare poteva infatti anche penetrare nei canali dentro la pineta e mettere in crisi il sistema di bonifica, che arriva a scolare fino alle porte di Ravenna (Regione Emilia-Romagna, 2003).

Studio a medio termine (19 mesi)

Lo studio dell'evoluzione a medio termine della foce è stato condotto attraverso 8 campagne di rilevamento topografico concentrate tra aprile 2003 e ottobre 2004 (Fig. 6 e Fig. 7): 14 aprile 2003, 22 aprile 2003, 9 maggio 2003, 4 giugno 2003, 20 giugno 2003, 13 febbraio 2004, 24 maggio 2004, 8 ottobre 2004. Le campagne del 2003 sono le stesse per le quali è stata effettuata un'analisi delle variazioni a breve termine, tra aprile e giugno 2003, in Ciavola et al. (2005).

La Figura 6 e la Figura 7 mostrano la conformazione morfologica della zona, con la presenza di ambienti costieri tipici di un *tidal inlet*: è ben visibile la formazione di una freccia litorale a sud della bocca di foce, di una zona di delta di fronte alla foce (delta di riflusso) influenzato dalle correnti di marea (Balouin et al., 2006b), di una barra di battigia e di un cordone dunare a nord.

E' stata analizzata una sezione N-S della bocca di foce (Fig. 6), ripetuta su tutti gli 8 rilievi: da aprile a giugno 2003 c'è stato uno spostamento della gola del canale di circa 40 m verso nord, come già notato da Ciavola et al. (2005).

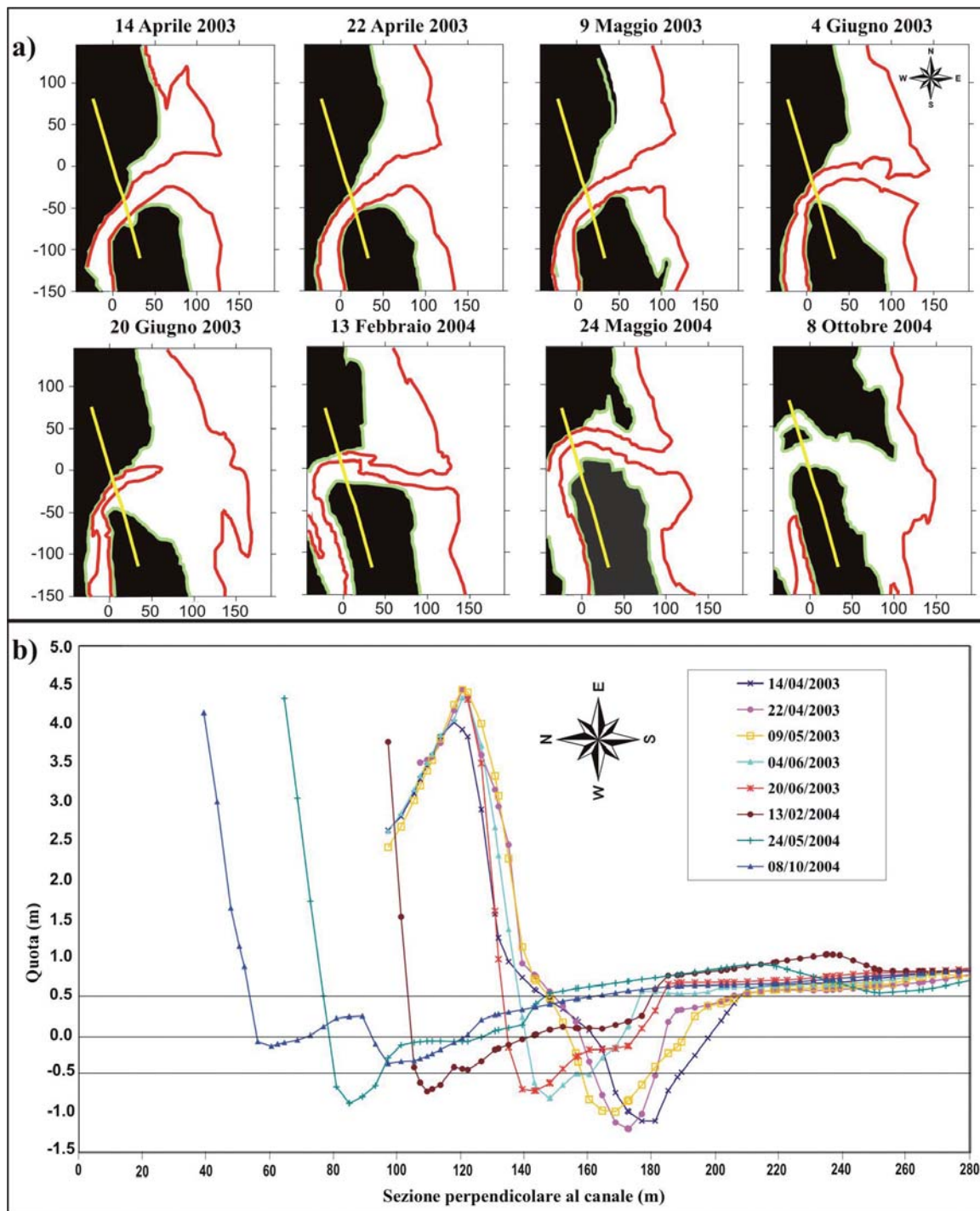


Figura 6 - a) Evoluzione schematica del tratto terminale del canale nelle 8 campagne di rilevamento topografico: la linea verde indica la batimetria 0.5 m; la linea rossa la batimetria 1 m. La linea gialla indica l'ubicazione della sezione N-S analizzata per studiare la migrazione laterale (verso nord) della zona di foce (unità di misura degli assi: m); b) Sezione perpendicolare al canale di foce, riportata per le 8 campagne di rilievo.

Un ulteriore spostamento verso nord di più di 70 m si è avuto successivamente da giugno 2003 a ottobre 2004. Queste variazioni sono associate ad una leggera diminuzione dell'area della sezione trasversale dell'alveo fino a giugno 2003, che aumenta poi a fine 2003, assestandosi nell'estate del 2004 intorno ai 40-50 m di larghezza. L'alveo del canale è più ristretto nel 2003 con l'argine sud più ripido, tendendo poi ad allargarsi man mano che nel tempo migra verso nord, con una diminuzione della pendenza dell'argine stesso ed un'evidente erosione della duna a nord. La migrazione verso nord del tratto terminale del canale è stata valutata in uno spostamento di circa 112 m, stimato intorno a 6.2 m al mese su tutto il periodo considerato. Questa migrazione non è stata però uniforme: il movimento più veloce si ha tra aprile e giugno 2003, dove lo spostamento è di 34 m nell'arco di poco più di due mesi. Da giugno 2003 a febbraio 2004 si ha lo stesso spostamento (33 m), ma in un periodo di tempo quadruplicato. Tra febbraio e maggio del 2004 si ha nuovamente una veloce migrazione verso nord di circa 45 m. Fino a ottobre 2004 la foce rimane infine pressoché stabile nella posizione assunta a maggio, allargando solo la sua sezione N-S.

La Figura 6 mostra anche la rotazione verso S-E dello stesso tratto, che era già stata notata dalla fotointerpretazione: il suo andamento diventa quasi ortogonale alla spiaggia nel periodo intercorso tra giugno 2003 e febbraio 2004, rimanendo poi tale per tutto il 2004.

Queste variazioni sono legate ed in parte causate dalla migrazione a nord della freccia litorale che si forma a sud della bocca di foce, alimentata dal predominante trasporto litorale verso nord (Ciavola et al., 2005) e che si presenta in erosione alla sua estremità orientale per tutto il 2003, erosione che va nel tempo ad interessare anche le spiagge più a sud. Nel lato nord della foce è presente un cordone di dune ben sviluppato, le cui creste spesso superano i 3.5 m ma che, come si è già detto, è in continua erosione a causa della migrazione verso nord della foce: fa eccezione il periodo tra il 4 ed il 20 giugno 2003, in cui è visibile una moderata accrezione, forse dovuta alle condizioni di bel tempo con scarse precipitazioni.

Di fronte a tali dune è presente una barra di battigia che migra in direzione E-O. Tale barra si muove verso terra nella primavera del 2003, mentre tende a spostarsi verso il largo nell'autunno del 2004, movimento confermato anche dalla presenza di una barra sommersa.

Anche il delta di marea che si forma di fronte alla bocca di foce a causa delle correnti tidali di riflusso (*ebb-tidal delta*), varia nel tempo la sua conformazione: dalle mappe di erosione-deposizione (Fig. 7b) è visibile una sostanziale deposizione fino all'estate del 2003. Nel periodo successivo il delta migra ulteriormente verso nord, ma l'asta terminale del canale ruota verso S-E: si ha perciò una predominanza delle zone in erosione soprattutto a sud della foce. Le zone in accrezione sono invece presenti di fronte alla bocca di foce e a nord, dove infatti si ha la formazione della barra di battigia.

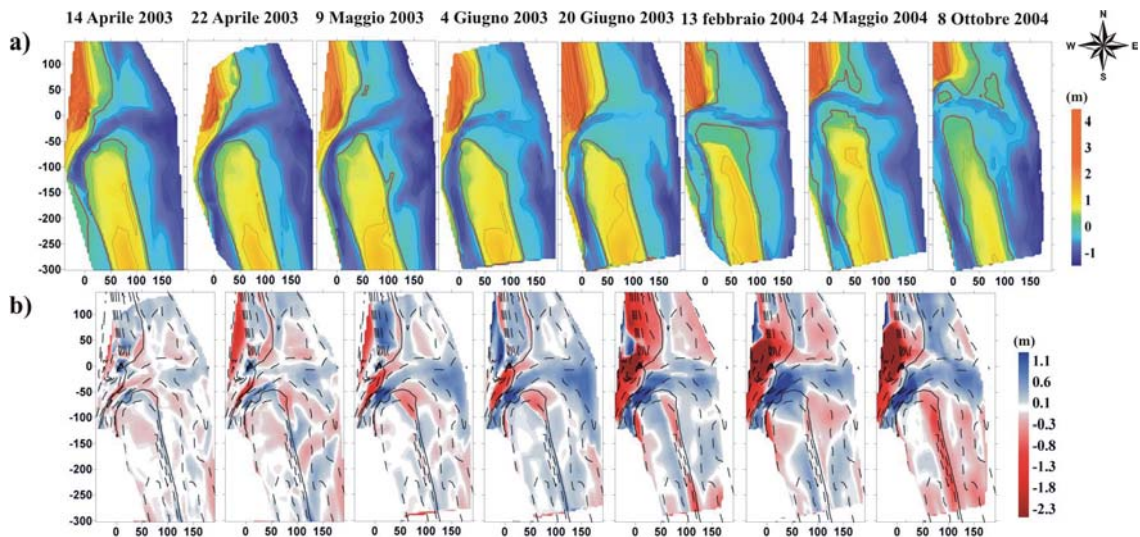


Figura 7 - a) DTM interpolati dai dati degli 8 rilievi topografici eseguiti tra aprile 2003 e ottobre 2004; b) Variazioni di quota calcolate prendendo come riferimento il primo rilievo: le linee di livello sullo sfondo sono ottenute dal rilievo del 14 aprile 2003. Si nota la mancanza dei dati nel tratto del canale parallelo alla linea di riva: tale area non era infatti stata rilevata ad aprile 2003, per cui non sono state calcolate le differenze di quota (unità di misura degli assi: m).

Attraverso i dati ricavati dai rilievi tra aprile 2003 e ottobre 2004, è stata effettuata una stima dei volumi di sedimento mobilitati nel tempo, con un andamento che rispetta nel complesso le dinamiche inizialmente rilevate nel periodo compreso tra aprile e giugno 2003 da Ciavola et al. (2005).

La Figura 8 schematizza tali variazioni volumetriche e mostra un modello concettuale del bilancio sedimentario della zona di studio. L'erosione della duna a nord è stata stimata sui 2200 m³/mese da aprile a giugno 2003 in accordo con Ciavola et al. (2005); poi fino ad ottobre 2004 si assesta sui 1600 m³/mese, ma si può affermare che rimane elevata per tutto il periodo in esame. Nel complesso, tra giugno 2003 e febbraio 2004 sono stati asportati 15700 m³ di duna (Tab. 2): tale erosione non è però stata accompagnata da una deposizione sul delta. Infatti, mentre da aprile a giugno 2003 è stato stimato un accumulo di 1950 m³/mese, nuovamente in accordo con Ciavola et al. (2005), successivamente si ha erosione per tutto l'inverno del 2004 (275 m³/mese).

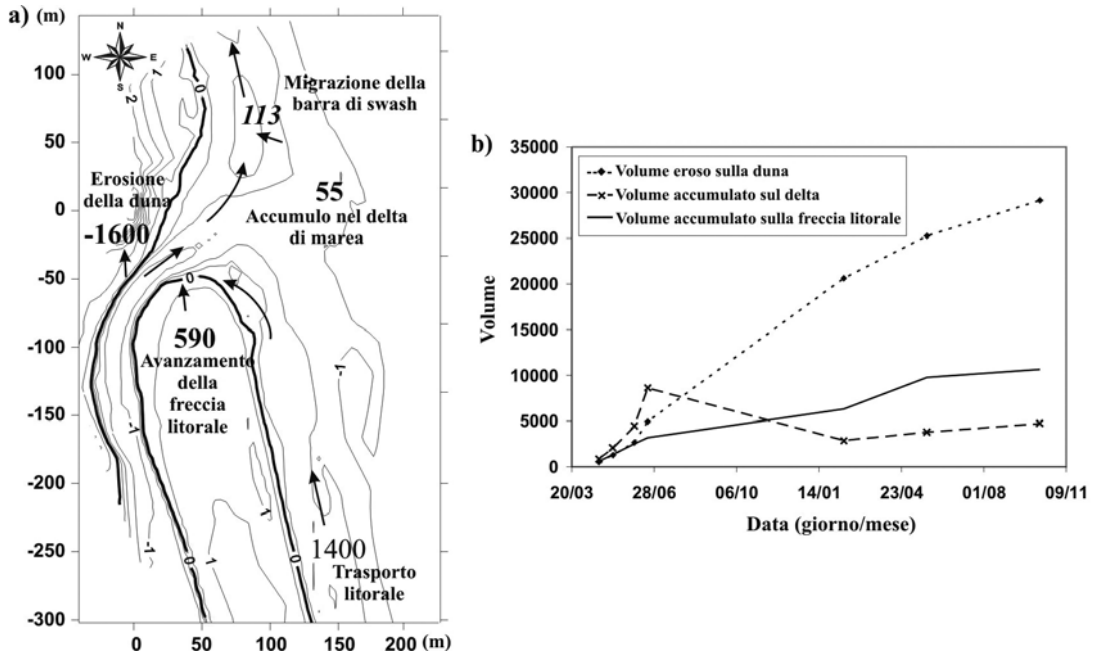


Figura 8 - a) Modello concettuale del bilancio sedimentario dell'area di foce del T. Bevano (valori numerici espressi in m³/mese) ottenuto dai rilievi topografici eseguiti nel periodo che va da aprile 2003 ad ottobre 2004. Le frecce indicano la direzione del trasporto sedimentario; **b)** Variazioni cumulative dei volumi di materiale accumulato sul delta e sulla freccia litorale e del materiale eroso sulla duna dell'area di foce del T. Bevano (valori numerici espressi in m³/mese), ottenuti dai rilievi topografici nel periodo che va da aprile 2003 ad ottobre 2004; **c)** Tabella con i volumi (m³) accumulati o erosi tra un rilievo ed il successivo.

L'area del delta di marea nell'intero periodo di studio mostra comunque un accumulo di sedimento che, mediato sull'intero periodo di studio, è di 55 m³/mese. Parte della sabbia proveniente dall'erosione delle dune a nord, a cui si aggiunge il sedimento derivato dall'erosione laterale delle dune lungo l'asta terminale del T. Bevano, va ad alimentare la barra di battigia più a nord che nell'estate del 2003 presentava una forte accrezione di 1250 m³/mese. Tale barra, come si è visto, migra verso terra per tutto il 2003 e parte del 2004 e si ha su di essa un accumulo di sedimento pari a 113 m³/mese.

Altro sedimento si accumula sulla freccia litorale che si forma a sud della foce, che a febbraio 2004 è notevolmente ampia. Tale freccia migra, come più volte illustrato, sia verso nord sia verso terra, con un accrescimento medio di 590 m³/mese su tutto il periodo in esame. Tale accrescimento ancora una volta non è però uniforme: l'accrescimento maggiore si ha sempre tra aprile e giugno 2003, con accumuli di 1430 m³/mese, che diventano poi di 500 m³/mese dall'autunno 2003 e per tutto il 2004. Il restringimento della sua ampiezza è in parte dovuto al trasporto litoraneo verso nord, stimato come 1400 m³/mese da Ciavola et al. (2005) che erode il margine orientale della freccia litorale e sposta il sedimento, incrementando la sua progradazione in questa direzione. Tra giugno 2003 e febbraio 2004 essa rimane relativamente stabile per quanto riguarda la sua posizione: in questo

periodo infatti si ha la rotazione verso S-E del tratto pre-fociale del canale del T. Bevano. Questo comportamento potrebbe indicare una diminuzione del trasporto lungo costa verso nord.

Per poter mettere in relazione le variazioni morfologiche osservate con le forzanti meteomarine, si è proceduto a svolgere una ricostruzione del clima antistante la zona di studio. Il settore di traversia che influenza la zona della costa ravennate è limitato a nord dall'apparato del delta del Fiume Po (Punta della Maestra) e a sud dalla zona del promontorio del Conero vicino Ancona. Il settore derivante da tali limitazioni risulta compreso geograficamente tra circa 25°N e 125°N; le onde al largo ritenute significative a livello di processi costieri per la zona ravennate, saranno considerate invece in un settore leggermente più ampio, tra 10°N e 140°N, per comprendere anche effetti dovuti alla rifrazione del moto ondoso sottocosta nei settori di confine.

Tabella 2 - Volumi (m³) accumulati (valori positivi) ed erosi (valori negativi) tra un rilievo ed il precedente.

Data Rilievo	V eroso	V accumulato	V accumulato	V Accumulato
	sulla Duna	sul Delta	sulla Freccia Litorale	sulla Barra di Battigia
22/04/2003	-530	861	601	2211
09/05/2003	-757	1182	762	2714
04/06/2003	-1380	2377	1162	2971
20/06/2003	-2265	4192	667	4721
13/02/2004	-15669	-5732	3124	3320
24/05/2004	-4640	903	3463	3104
08/10/2004	-3878	934	867	4242

I dati di moto ondoso sono stati divisi e raggruppati in settori di ampiezza 10° (ad es.: il settore indicato con "10°N" raggruppa le onde provenienti tra 0° e 10°N), ed in classi di altezza spaziate 1 m. E' stata considerata la condizione di "mare calmo" per onde inferiori a 0.25 m di altezza.

Sull'intero set di dati disponibili nel dataset della Boa di Ancona, da marzo 1999 a marzo 2006, circa il 20% dei dati è mancante per problemi di mal funzionamento della Rete Ondametrica Nazionale. Il 35% delle onde registrate nell'intero periodo (1999-2006) proviene dal settore considerato come efficace, e le percentuali indicate in seguito si riferiranno a questo sott'insieme. Quasi il 15% del tempo in cui le onde appartengono al settore considerato è da attribuire alla condizione di mare calmo.

Si nota l'affermarsi di due settori dominati dal moto ondoso (Fig. 9): il primo compreso tra i 20° ed i 50° N, in cui le mareggiate di Bora raggiungono presenze significative di onde con altezza superiore ai 3 m. Il secondo, attorno ai 120° N, in cui si raggruppano le onde con maggior frequenza di apparizione (percentuali superiori al 4% sul totale delle onde registrate per i singoli settori di ampiezza 10°), mostrando rispetto ai settori più settentrionali minor energia ed altezza.

Questi risultati sono in accordo con studi precedenti dove risulta che nel Mare Adriatico prevalgono le mareggiate generate dai venti di Scirocco (S-E) e di Bora (N-E): la velocità massima del vento di Bora è normalmente più alta rispetto a quella dello Scirocco. Tuttavia nella zona di studio, situata nella parte nord-orientale dell'Adriatico, le tempeste di Scirocco hanno un *fetch* più lungo rispetto a quelle di Bora (Gambolati et al., 1998). Il mare regnante proviene dunque da E, S-E; il mare dominante da N-E (Idroser, 1996).

Nel 2004 manca il 23% delle misurazioni, il 39% appartiene al settore 10°-140°N, di cui il 15% è di mare calmo.

Il 2003 è stato un anno caratterizzato da pochi eventi ad alta energia, essenzialmente concentrati nel periodo gennaio-febbraio con dominanza degli eventi da Bora. Inoltre tra ottobre e novembre 2003 si sono verificate condizioni di moto ondoso perturbato per lunghi periodi in seguito a venti da N-E associati a condizioni tidali di sizigie (Fig. 10c). Tali eventi non compaiono però nella banca dati delle mareggiate in quanto non hanno superato la soglia scelta.

Il 2004 è stato invece un anno con maggior contenuto energetico, con maggiore presenza di eventi da Scirocco. Inoltre, tra il 18 ed il 22 gennaio 2004, sono state identificate 2 mareggiate particolarmente intense, di classe 2 e 3, ancora associate a maree sizigiali elevate (Tab. 3 e Fig. 10c).

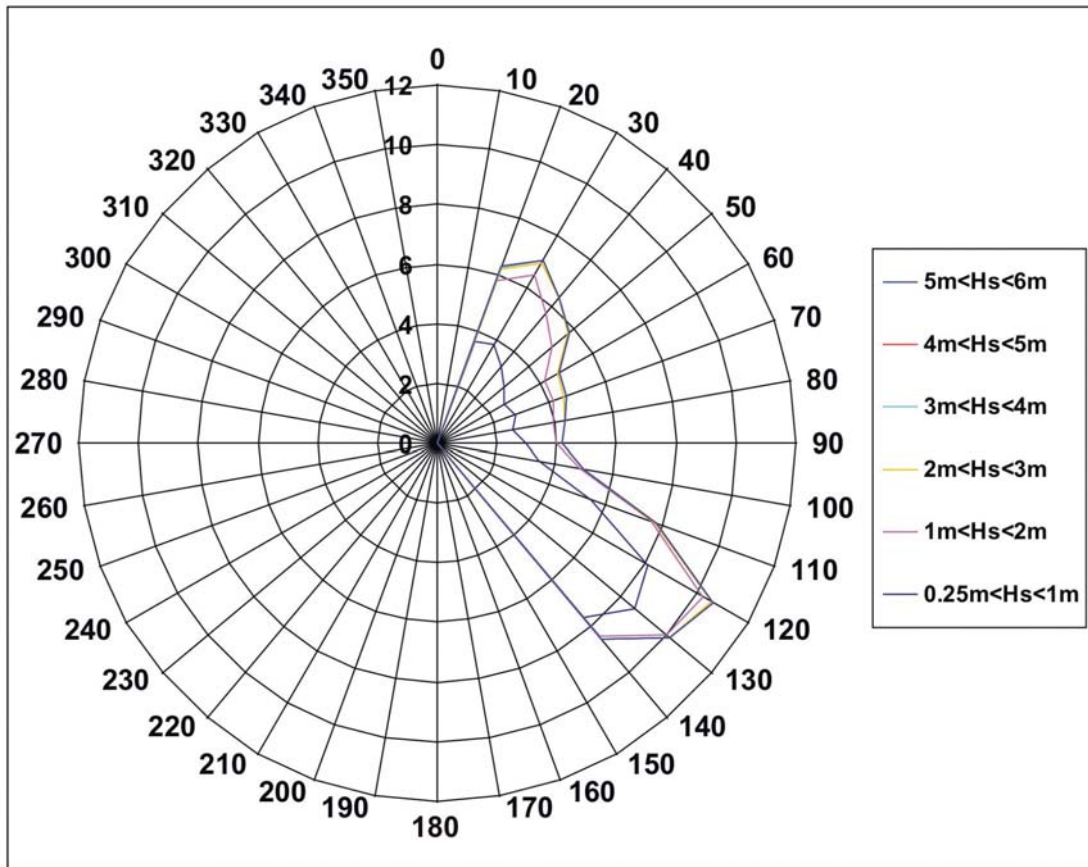


Figura 9 - Frequenza percentuale cumulativa di apparizione del moto ondoso divisa per settori di provenienza di ampiezza 10° , distinguendo classi di altezza di 1.0 m per ogni direzione. I dati provengono dalla boa ondometrica di Ancona e sono stati trasposti al largo di Ravenna (30 m di profondità); coprono il periodo compreso tra marzo 1999 e marzo 2006.

In questi mesi, consultando i dati delle precipitazioni e dei livelli idrometrici raccolti nelle stazioni idrografiche situate nel bacino del T. Bevano, acquisiti tramite interfaccia Dexter (ARPA-SIM; <http://www.arpa.emr.it>), si ricava che sono stati registrati tre eventi di piena concentrati sempre tra ottobre e novembre 2003.

La particolare configurazione della foce che si ritrova a febbraio 2004, è quindi in parte dovuta alla migrazione della freccia litorale verso nord che ha chiuso sempre più il tratto pre-foce del canale, restringendone la sezione.

I successivi eventi di piena, ostacolati da questa ostruzione, hanno generato una maggiore escavazione del tratto settentrionale della sponda di foce, aumentando l'erosione laterale del cordone dunare.

Nel rilievo di maggio 2004 si nota poi che la foce ricomincia a migrare verso nord, pur mantenendo la sua nuova conformazione. Tra febbraio e maggio 2004 si sono verificate infatti due forti mareggiate generate da venti di S-E, entrambe associate a maree sizigiali elevate (Tab. 3 e Fig. 10c).

In particolare la mareggiata a inizio maggio, di classe 2, ha avuto un notevole impatto su tutto il litorale ravennate.

In questo periodo dunque, la freccia ricomincia ad essere erosa nella sua estremità orientale e a migrare verso nord, indice di una ripresa del trasporto lungo costa. Fino a ottobre 2004 si hanno 3 mareggiate di classe 1, di breve durata e tutte da N-N-E, non associate a condizioni tidali estreme. Solo a fine settembre si verifica una forte mareggiata, sempre da N-E e di classe 3, associata ad un'alta marea sizigiale con punte di 0.80 m (Tab. 3 e Fig. 10c).

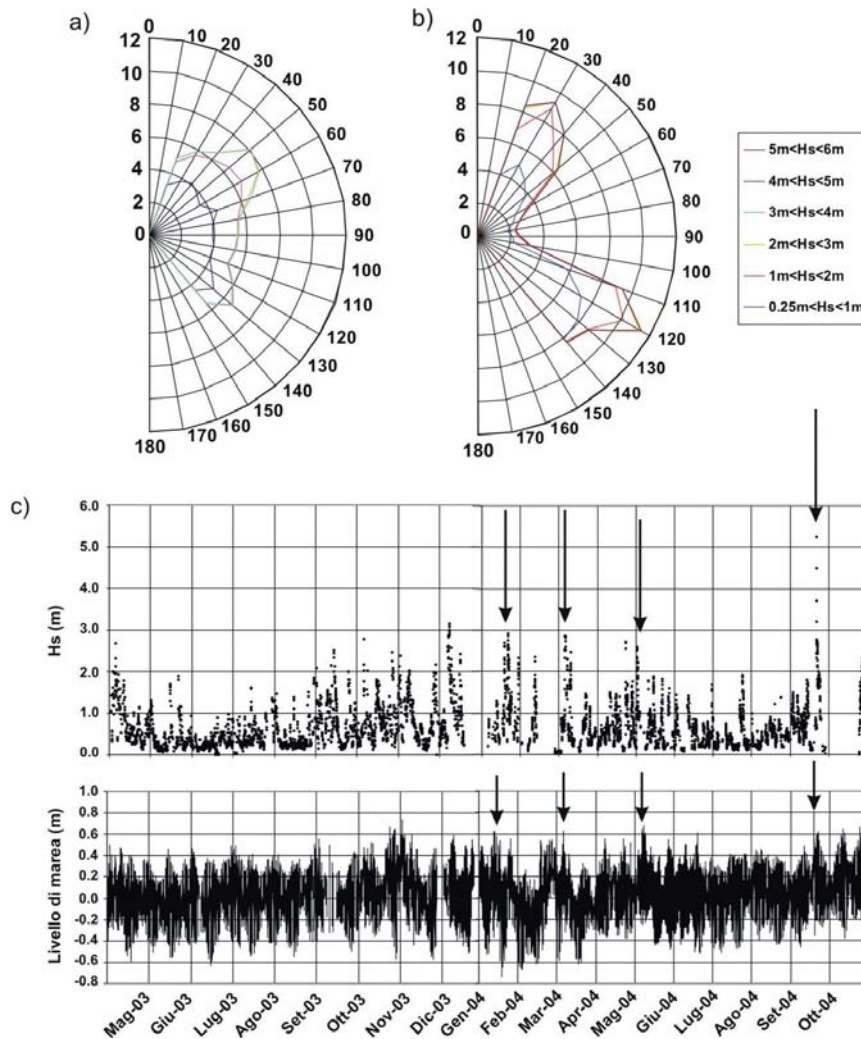


Figura 10 - Clima meteomarinico ricostruito per il periodo di studio tra aprile 2003 e ottobre 2004. In particolare: i grafici a) e b) rappresentano le frequenze percentuali cumulative di apparizione del moto ondoso nel settore di traversia, divise per settori di provenienza di ampiezza 10° e distinguendo classi di altezza di 1.0 m per ogni direzione, rispettivamente per l'anno 2003 e per l'anno 2004; dati boa di Ancona trasposti a Ravenna. Il grafico c) mostra le Hs delle onde all'interno del settore di traversia e le rispettive variazioni tidali misurate dal mareografo di Porto Corsini (Ravenna); le frecce nere indicano la posizione temporale delle mareggiate di casse 2 e 3 verificatesi nel periodo oggetto di studio (si veda la Tabella 3).

Come è possibile vedere dalla Figura 6 la mareggiata produce un completo interrimento della foce. Si può quindi concludere che la migrazione della foce verso nord era controllata da eventi di moto ondoso da Scirocco, mentre gli eventi da Bora non facevano altro che occluderla.

Morfodinamica della foce attuale del T. Bevano

Ad inizio 2006 la Regione Emilia-Romagna eseguiva dei lavori di chiusura della vecchia foce e di apertura di una nuova bocca, situata circa 500 m più a sud (Fig. 2). La vecchia foce veniva chiusa utilizzando la sabbia dragata per aprire la nuova foce e la zona dello scolmatore, un canale in corrispondenza dell'ultimo meandro con quota di fondo al medio mare e con funzione di facilitare lo smaltimento delle acque in caso di piena. In corrispondenza della nuova foce veniva costruita una palificata in legno posta sul lato nord, anche a protezione dell'intervento di ricostruzione della duna nella zona della vecchia foce realizzato tramite l'installazione di viminate morte e piantumazione di vegetazione.

Tabella 3 - Parametri delle mareggiate classificate per gli anni 2003 e 2004 (nrg tot= energia totale; dir max nrg= direzione massima energia). In grassetto sono evidenziate le mareggiate nel periodo compreso tra aprile 2003 e ottobre 2004. Le due mareggiate in corsivo sono quelle che sono state più dannose per il litorale emiliano-romagnolo.

Periodo	Classe	nrg tot	durata ore	dir max nrg	Hs max	Hs media	tp medio
06/01/2003	3	141.6	18	60	3.6	2.7	7.1
08/01/2003	2	72.2	19	45	2.8	1.9	6.7
11/01/2003	3	224.9	44	44	3.1	2.2	6.9
21/01/2003	1	24	7.5	124	2	1.8	6.2
24/01/2003	3	266.3	59	60	2.8	2.1	6.2
31/01/2003	2	106	26	56	2.6	2	6.2
04/02/2003	1	34.5	6.5	34	2.7	2.3	6.6
18/01/2004	2	85.3	18.5	37	2.7	2.1	6.9
21/01/2004	3	165	32.5	35	2.9	2.2	6.8
30/01/2004	1	36.8	9	17	2.3	2	6.3
12/02/2004	1	36.3	11	73	2.4	1.8	6.1
07/03/2004	2	89.2	14	110	2.9	2.5	7.9
09/03/2004	1	44.6	11.5	29	2.3	2	6.5
11/03/2004	2	86.6	23.5	93	2.5	1.9	7.2
<i>04/05/2004</i>	2	<i>99.7</i>	<i>22.5</i>	<i>110</i>	2.6	2.1	7.2
17/05/2004	1	17.9	6.5	24	1.8	1.7	5.9
27/07/2004	1	38.1	12.5	12	1.9	1.7	6.6
17/09/2004	1	21.3	7.5	36	1.9	1.7	6.1
<i>24/09/2004</i>	3	<i>343.1</i>	<i>68.5</i>	<i>17</i>	5.6	2.1	6.8
31/10/2004	2	70.8	17	104	2.4	2	7.5
07/11/2004	1	28.6	7.5	15	2.3	1.9	6.7
07/11/2004	3	181.5	28.5	16	3.3	2.5	7.1
09/11/2004	2	83.6	23.5	133	2.4	1.9	7
26/12/2004	3	247.4	41	114	3.4	2.4	8.6
29/12/2004	3	222.1	34.5	47	3.3	2.5	7.1

Una volta terminati i lavori, è cominciato il monitoraggio della nuova foce, eseguito sia tramite campionamenti sia attraverso campagne di rilievi topobatimetrici. Come già accennato, sono stati eseguiti prelevamenti di campioni sull'asta terminale del canale della vecchia foce, sulla spiaggia emersa e su quella sommersa per ottenere una caratterizzazione granulometrica del sito precedentemente ai lavori.

I sedimenti della spiaggia emersa sono risultati sabbie da medie a fini, mentre la sabbia finissima si ritrova con regolarità nel campione prelevato al piede della barra sommersa. I campioni nell'alveo T. Bevano mostrano invece una variabilità nelle caratteristiche granulometriche, che vanno dal silt alla sabbia media. Inoltre, i sedimenti di spiaggia emersa, che presentano una distribuzione omogenea nei diametri medi, sono ben classati e con asimmetria poco pronunciata (intorno allo zero). Al contrario, i campioni di fiume hanno una distribuzione più eterogenea nei diametri medi, sono molto poco classati e hanno sempre code di materiali fini (Fig. 11).

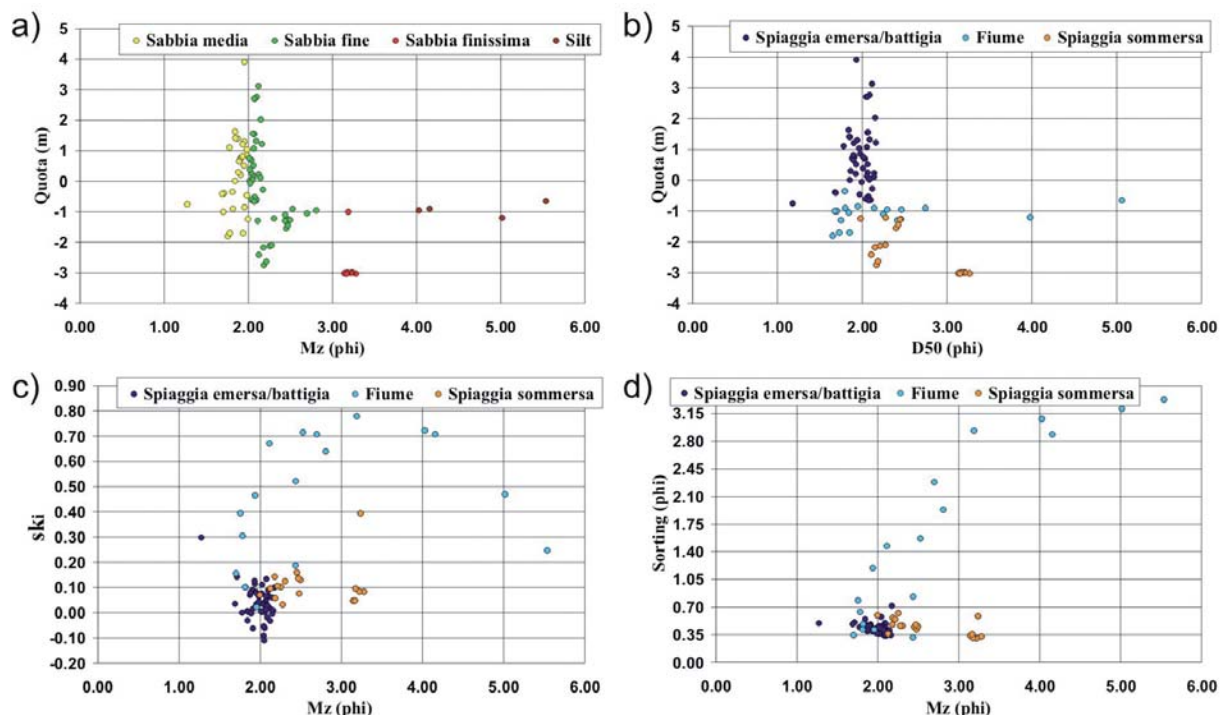


Figura 11 - Grafici di distribuzione di alcuni parametri granulometrici di Folk & Ward (1957) ricavati dalle analisi sedimentologiche effettuate sui campioni prelevati, quali diametro medio (Mz), mediana (D₅₀), sorting e skewness (sk_i). Il grafico a) mostra la distribuzione del diametro medio; gli altri tre indicano le distribuzioni dei parametri raggruppando i punti in base all'ambiente sedimentario e cioè fiume, spiaggia emersa/battigia e spiaggia sommersa.

Prima dell'intervento è stato eseguito per conto della Regione Emilia-Romagna un rilievo di inquadramento della situazione morfologica, denominato rilievo "pre-lavori" (dicembre 2005), di cui si è già detto sopra. La stessa Regione ha fatto poi eseguire anche i rilievi per inquadrare la zona a fine lavori: una batimetria ad aprile 2006 ed una topografia della spiaggia emersa a fine maggio 2006 (Fig. 12).

I rilievi "post-lavori" sono stati eseguiti in un periodo di tempo troppo distanziato per poterli considerare parte di un'unica condizione morfologica della spiaggia: si è quindi deciso di considerare la batimetria di aprile 2006 come rappresentativa della situazione di fine-lavori per quanto riguarda la spiaggia sommersa e la bocca di foce, e la topografia di maggio 2006 rappresentativa della stessa situazione per la spiaggia emersa.

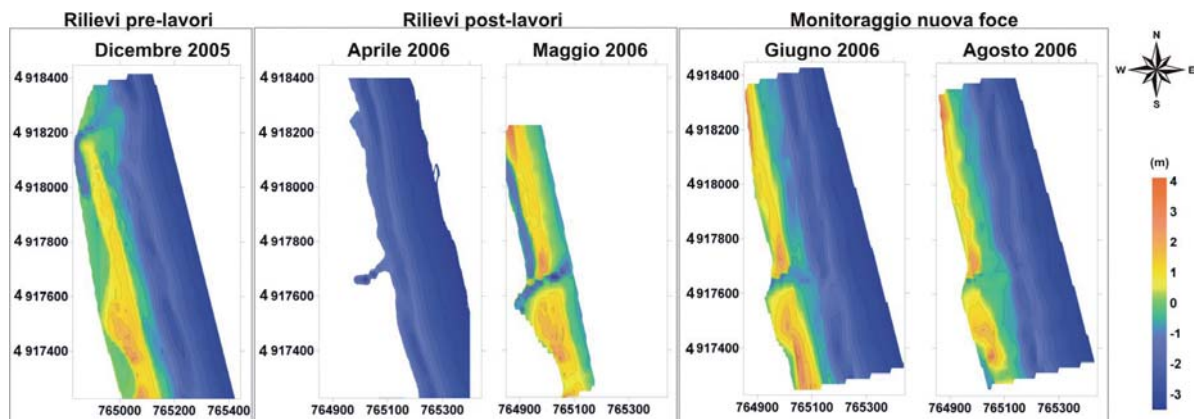


Figura 12 - DTM interpolati dai rilievi topobatimetrici eseguiti. Si noti come i rilievi post-lavori siano stati interpolati in due mappe separate, una per la batimetria (aprile 2006) ed una per la topografia (maggio 2006). Sistema di coordinate: UTM32* ED50.

Sono poi state eseguite dagli autori due campagne di rilievi topobatimetrici a fine giugno e a fine agosto 2006 (Fig. 12). Ad integrazione di questi dati sono stati fatti anche vari sopralluoghi per verificare la tenuta dell'intervento e per pianificare le future campagne.

L'intervento ha incluso anche l'apertura di un canale, all'altezza dell'ultimo meandro della vecchia foce, con quota di fondo al medio mare, situato circa 400 m a sud della nuova foce, con funzione di scolmatore in caso di alta marea o di piena del fiume (Regione Emilia-Romagna, 2003).

Tale scolmatore è ben visibile sul rilievo di agosto 2006.

Il lato settentrionale della foce è abbastanza stabile grazie alla palificata posta a protezione della duna a nord. In realtà essa presenta dei problemi e periodicamente la Regione è costretta ad intervenire con lavori di ripristino dei pali in legno. Anche durante il periodo di monitoraggio, eseguito quasi interamente in estate, le onde hanno più volte scavalcato i pali ed eroso la spiaggia retrostante, producendo la fluidificazione delle sabbie e quindi il loro conseguente refluito attraverso i pali stessi. In altri casi ci sono stati dei cedimenti dovuti a processi di scalzamento al piede, si ritiene da parte delle correnti di marea.

Il lato sud della foce mostra la presenza di una freccia litorale, che è stata erosa nel tempo nella sua estremità N-E ed è contemporaneamente leggermente avanzata verso nord (Fig. 13), andando a restringere in parte la bocca di foce. Questo comportamento sembra essere assimilabile alle dinamiche sopra descritte per la vecchia foce, anche se la palificata in legno posta a nord impedisce la sua migrazione in tale direzione. La zona del canale di foce è poi sempre caratterizzata da deposizione di sedimento, che contribuisce anch'essa a chiudere la zona della bocca.

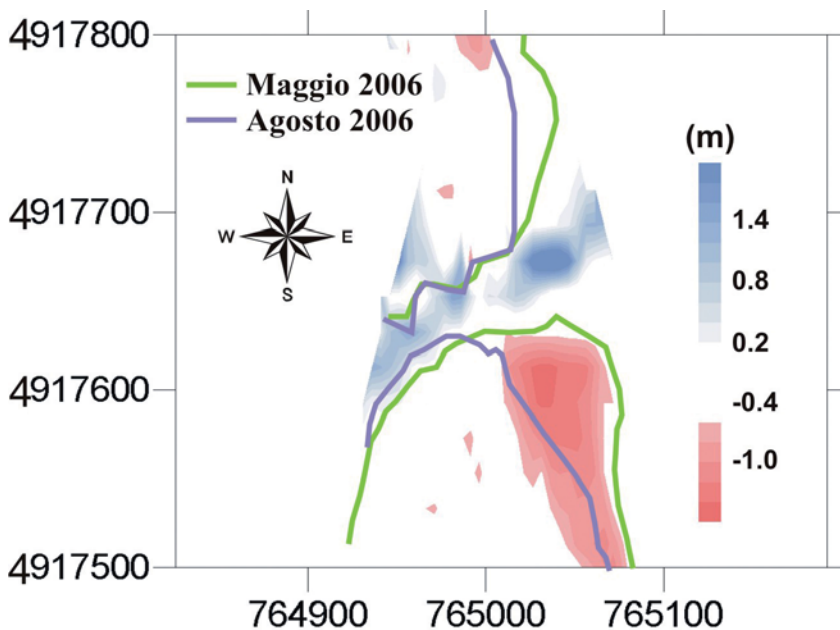


Figura 13 - Mappa di erosione-deposizione sulla spiaggia emersa e nel tratto pre-fociale del canale del T. Bevano, nel periodo di tempo tra maggio e agosto 2006. Sistema di coordinate: UTM32 ED50.

La Figura 14 mostra i DTM interpolati utilizzando solo i punti sulla spiaggia sommersa, per i quali è stata creata una scala di colori scelta in modo tale da mettere in risalto la presenza delle barre sommersa al largo della foce. Già ad aprile 2006, quando la nuova foce era funzionante da quasi due mesi, si era sviluppata una barra continua, parallela a riva. A giugno l'interpolazione mostra il medesimo sistema di barre che però non ha più la stessa continuità e sembra attaccarsi verso terra al terrazzo di bassa marea/barra intertidale subito a sud della zona di foce.

Ad agosto infine, le barre cominciano a mostrare una certa ritmicità. In ogni caso le creste delle barre rimangono comunque al di sotto della profondità di 1 m. Il riquadro nero mostra la posizione della zona più esterna della bocca di foce: la sua conformazione è in parte visibile solo nel rilievo di aprile 2006 in quanto si è successivamente spostata verso terra.

Discussione

Negli ultimi 10 anni la foce del T. Bevano è migrata verso nord con un tasso di spostamento elevato, tanto da essere osservato direttamente anche tra campagne di rilievo distanziate tra loro pochi mesi. In media tale spostamento, abbastanza uniforme, è stato stimato intorno a 70 m/anno. Quasi sempre la migrazione verso nord ha interessato tutto l'apparato fociale.

Solo tra l'autunno del 2003 e l'autunno del 2004, la zona di foce rimane nel complesso stabile, migrando di poche decine di metri: in realtà in questo periodo si allarga la sua sezione N-S, perché la duna a nord viene notevolmente erosa e si ha la rotazione del segmento terminale del canale di foce verso S-E. Il comportamento differente di questo periodo è confermato anche dall'osservazione della variazione della linea di riva: essa rimane nel complesso stabile, sia a nord sia a sud della foce, fino al 2004, quando invece si ha un evidente arretramento (circa 20 m) osservabile sui voli aerei e sui DTM interpolati dai rilievi diretti eseguiti in campagna.

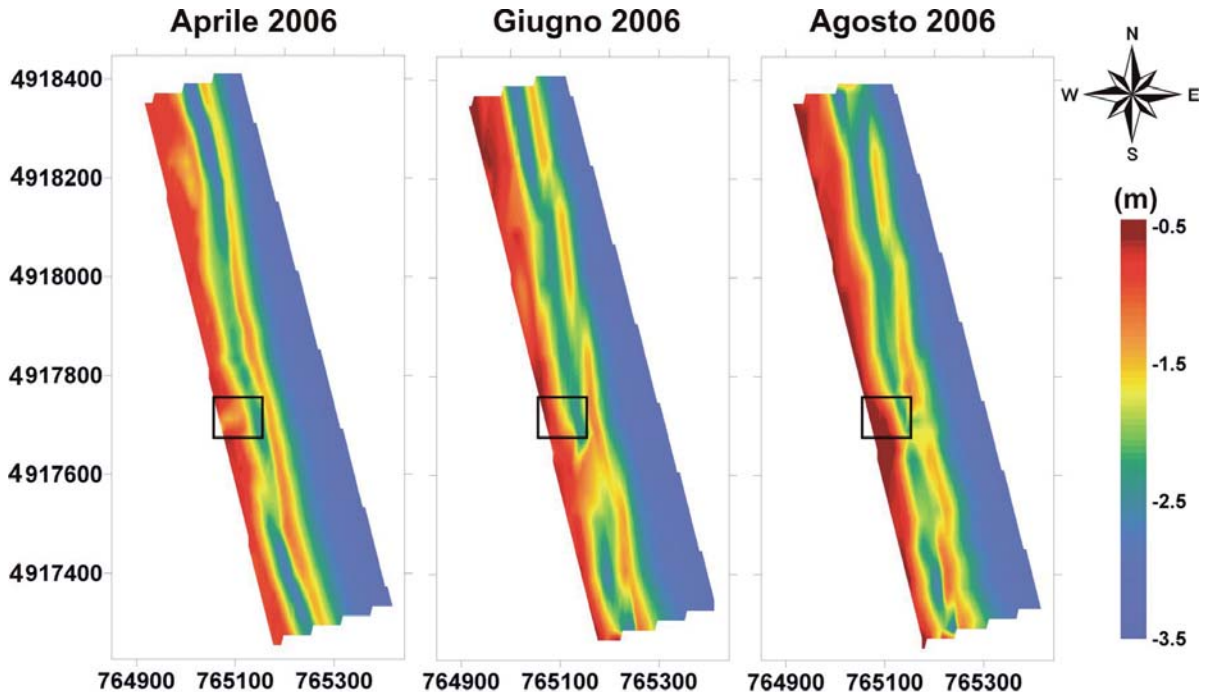


Figura 14 - DTM interpolati dai rilievi batimetrici eseguiti ad aprile, giugno e agosto 2006. Il riquadro nero indica la posizione della zona più esterna della bocca della foce del T. Bevano. La scala cromatica è stata creata appositamente per evidenziare la presenza delle barre.

Ciavola et al. (2005) hanno osservato che se la linea di riva rimane stabile, probabilmente è perché c'è apporto di sedimento dovuto all'erosione delle dune che immette sabbia nel bilancio sedimentario di tutta l'area. In questo periodo infatti le dune a nord sono erose ed il sedimento si deposita sul delta di marea (delta di riflusso) e sulla barra di battigia a nord della foce, che migra a riva e quindi protegge dall'erosione il tratto di costa subito a nord. Il bilancio sedimentario però non si chiude, quindi il sedimento eroso sulla duna va in parte ad alimentare anche le spiagge tra la foce e Lido di Dante ed è forse in parte trasportato al largo.

Lo studio a breve termine eseguito con l'utilizzo di sabbie traccianti da Balouin et al. (2006b) ha messo infatti in evidenza il rapporto tra la foce ed il mare aperto, con l'influenza del trasporto lungo costa e delle correnti di marea che, in particolari condizioni di sizigie, spingono la bocca verso nord e portano la sabbia erosa dalle dune ad alimentare le spiagge a nord. Comportamento qui confermato sia dallo studio a medio termine sia dal monitoraggio della foce attuale.

Inoltre è confermata la formazione di una freccia litorale a sud della bocca di foce, che migra verso nord ed in particolari condizioni va a restringere la sezione della bocca stessa. Ciò crea una particolare conformazione morfologica della zona ostruendo lo sbocco a mare delle acque durante le piene. Questo comportamento è

stato ben evidenziato durante lo studio a medio termine, ma si può osservare una situazione simile anche nella morfologia della zona nel 2002, dove la freccia litorale ostruiva in maniera evidente la bocca di foce (Fig. 5). L'evoluzione della nuova foce, aperta circa 500 m più a sud mostra, già dai primi mesi di monitoraggio, una ripresa delle dinamiche osservate in passato: la formazione di una freccia litorale a sud che tende a migrare verso terra e leggermente verso nord, ostruendo la bocca di foce e producendo un elevato deposito di sedimento nel tratto pre-fociale e sul delta sommerso. Inoltre si può osservare come la foce attuale sia posizionata poco più a nord rispetto all'ubicazione che aveva nel 1996 (Fig. 5).

Considerazioni conclusive

È stato illustrato il comportamento morfodinamico della foce del T. Bevano, che fino al 2005 era libera di seguire un'evoluzione naturale, influenzata sia dal trasporto lungo costa dominante sia dalle correnti tidali. Gli autori ritengono che le dinamiche rilevate possano essere assimilate a quelle di un piccolo *tidal inlet* di tipo misto, governato dall'interazione tra il moto ondoso e le correnti tidali. In particolare, influiscono sulla sua conformazione le correnti di riflusso che contribuiscono alla formazione di un delta di riflusso di fronte alla foce stessa. Le correnti che si producono durante l'innalzamento del livello delle acque in alta marea non creano alcuna morfologia in quanto l'*inlet* non presenta una zona di retro-barriera, essendo l'area verso terra costituita solo dal tratto terminale del canale stesso.

La conformazione di questo tratto terminale, che si sviluppa parallelo alla linea di riva, induce la formazione di una freccia litorale, che è stato dimostrato migrare verso nord a seguito dell'azione della corrente lungo costa dominante. La ricostruzione del clima meteomarinario antistante la zona di studio ha confermato che il mare dominante proviene da S-E, per cui la corrente lungo costa si muove da sud verso nord producendo la migrazione della freccia in tale direzione. Questo andamento è stato confermato sia dagli studi a breve termine effettuati da Ciavola et al. (2005), sia dagli studi a lungo e medio termine presentati in questo lavoro.

La maggior parte dei grandi *tidal inlets* studiati in letteratura migrano nella direzione del trasporto lungo costa dominante, come accade per esempio nel sistema "*barrier-inlet*" presente lungo la Gulf Coast della Florida (Davis e Barnard, 2003), nel sistema di *inlets* della Ria Formosa nel sud del Portogallo (Balouin e Howa, 2002, Vila-Concejo et al., 2002) ed in parte anche nell'*Ameland Inlet* in Olanda (Cheung et al., 2007). Aubrey e Speer (1984) mostrano tre casi in cui un *inlet* può migrare in direzione opposta alla corrente lungo costa dominante, sotto l'influenza di particolari condizioni morfodinamiche che però non sono presenti nella zona di foce del T. Bevano, oppure a causa di un marcato aumento nella frequenza delle mareggiate in direzione opposta a quella dominante. Lo studio del clima meteomarinario effettuato nel periodo di analisi delle variazioni a medio termine ha messo in evidenza che quando si hanno mareggiate intense da N-E la migrazione della foce del T. Bevano in parte si arresta, ma tali condizioni non sono mai durate tanto a lungo da determinarne un'inversione.

Prima dell'intervento di deviazione, lo spostamento verso nord della freccia litorale produceva la migrazione in tale direzione di tutta la zona di foce, ma a volte, in particolari condizioni di bel tempo e mare calmo, la freccia migrava più velocemente e andava a restringere la sezione della bocca di foce, impedendo lo smaltimento delle acque in caso di piena del T. Bevano, con conseguente erosione delle dune e della pineta presenti a nord della foce. Dai dati ricavati dalle prime fasi del monitoraggio della foce attuale, sembra che le dinamiche in atto nella vecchia foce siano riprese.

La foce attuale è stata però monitorata solo per il periodo estivo. Studi futuri monitoreranno la sua evoluzione in inverno ed in condizioni estreme di onde e maree, per poter così valutare se il sedimento depositato verrà mobilitato con le stesse dinamiche della vecchia foce o se il trasporto lungo costa subirà una riduzione evidente in mancanza dell'input sedimentario prodotto dall'erosione delle dune. Sarà inoltre necessario monitorare il comportamento del canale di foce durante le piene e la tenuta dei pali di contenimento a protezione della duna ricreata a nord.

Ringraziamenti

Un ringraziamento speciale per gli indispensabili aiuti nell'esecuzione dei rilievi topobatimetrici e dei campionamenti al Dott. Yann Balouin, al Dott. Emanuele Castiglione, a Christian Boettger e a Francesco Menani. Un sentito grazie anche al Dott. Paolo Luciani per l'aiuto nell'inquadramento topografico dei dati raccolti nei rilievi. Si ringrazia inoltre il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per aver messo a disposizione l'immagine satellitare QuickBird ed il volo LIDAR utilizzati per la digitalizzazione della linea di

riva. Le foto aeree pubblicate (© CGR Parma) sono state utilizzate sempre su concessione del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Il monitoraggio della nuova foce del T. Bevano è stato eseguito in collaborazione con il Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, sede di Ravenna, sotto la direzione lavori del Dott. Claudio Miccoli. L'Ing. Carlo Albertazzi (Servizio Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica della Regione Emilia-Romagna) ha coordinato le attività di studio.

Bibliografia

- Armaroli C., Balouin Y., Ciavola P. e Capatti D. (2005) - *Nearshore bars as a natural protection of beaches, field evidences from Lido di Dante beach, Adriatic Sea*. Proceedings of the First International Conference on Coastal Conservation and Management in the Atlantic and Mediterranean, Eurocoast Portugal, Porto (Portugal): 295-303.
- Aubrey D.G. e Speer P.E. (1984) - *Updrift migration of tidal inlets*. Journal of Geology, 92: 531-545.
- Balouin Y. e Howa H. (2002) - *Sediment transport pattern at the Barra Nova inlet, south Portugal: a conceptual model*. Geo-Marine Letters, 21: 226-235.
- Balouin Y., Ciavola P., Anfuso G. e Armaroli C. (2003) - *Relationship between bar migration and swash duration: field assessments at Lido di Volano beach, Adriatic Sea, Northern Italy*. Atti di: 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, A. Sanchez-Arcilla and A. Bateman (ed.), IAHR, Barcellona, Spagna. Pp. 1121-1133.
- Balouin Y., Ciavola P. e Armaroli C. (2006a) - *Sediment transport patterns and coastal evolution at Lido di Dante beach, Adriatic Sea*. Proceedings of Coastal Dynamics 2005, ASCE, New York (USA).
- Balouin Y., Ciavola P. e Michel D. (2006b) - *Support of subtidal tracer studies to quantify the complex morphodynamics of a river outlet: the Bevano, NE Italy*. Journal of Coastal Research, SI 39: 602-607.
- Cheung K.F., Gerritsen F. e Cleveringa J. (2007) - *Morphodynamics and sand bypassing at Ameland Inlet, The Netherlands*. Journal of Coastal Research, 23 (1): 106-118.
- Ciavola P., Corbau C., Cibin U. e Perini L. (2003) - *Mapping of the coastal zone of the Emilia-Romagna region using Geographical Information Systems*. Proceedings of MEDCOAST 2003 Conference, E. Ozhan (ed.), MEDCOAST, Ravenna (Italy): 2363-2374.
- Ciavola P., Gatti M., Armaroli C. e Balouin Y. (2004) - *Valutazione della variazione della linea di riva nell'area di Lido di Dante (RA) tramite GIS e monitoraggio con GPS cinematico*. Atti della XXI Giornata dell'Ambiente, Aree Costiere, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma. Pp. 113-121.
- Ciavola P., Billi P., Armaroli C., Preciso E., Salemi E. e Balouin Y. (2005) - *Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo*. Geologia Tecnica ed Ambientale, 2005/1: 41-57.
- Coastal Engineering Research Center (1984) - *Shore Protection Manual*. U.S. Army Engineer, Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Conley D.C. (1999) - *Observations on the impact of a developing inlet in a bar built estuary*. Continental Shelf Research, 19: 1733-1754.
- Corsini S. e Inghilesi R. (2004) - *Atlante delle onde nei mari italiani*. APAT.
- Davis Jr. R.A. e Hayes M.O. (1984) - *What is a wave-dominated coast?* In: Greenwood B., Davis Jr., R.A. (Ed), Hydrodynamics and Sedimentation in Wave-Dominated Coastal Environments. Marine Geology, 60: 313-329.
- Davis Jr. R.A. e Barnard P. (2003) - *Morphodynamics of the barrier-inlet system, west-central Florida*. Marine Geology, 200: 77-101.
- Davis Jr. R.A. e FitzGerald D.M. (2004) - *Beaches and Coasts*. Blackwell Science Ltd a Blackwell Publishing Company, Oxford, UK. Pp. 419.
- Dolan R. e Hayden B. (1983) - *Patterns and prediction of shoreline change*. In: CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion, Komar P. D. (ed.), CRC Press, Boca Raton, USA. Pp. 123-149.
- Dolan R. e Davis R.E. (1992) - *An intensity scale for Atlantic coast northeast storms*. Journal of Coastal Research, 8 (4): 840-853.
- FitzGerald D.M., Buynewich I.V., Davis Jr R.A. e Fenster M.S. (2002) - *New England tidal inlets with special reference to riverine-associated inlet systems*. Marine Geology, 48: 179-208.

- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journal of Sedimentary Petrology, 27: 3-26.
- Gambolati G., Giunta G., Putti M., Teatini P., Tomasi L., Betti I., Morelli M., Berlamont J., De Backe K., Decouttere C., Monbaliu J., Yu C.S., Broeker I., Kristenser E.D, Elfrink B., Dante A. e Gonella M. (1998) - *Costal evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise, and Natural and Anthropic Land Subsidence*. In: CENAS, Kluwer Academic (ed.), Dordrecht, Paesi Bassi. Pp. 1-34.
- Idroser (1996) - *Progetto di piano per la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. Pp. 100-122.
- Mendoza E.T. e Jimenez J.A. (2004) - *Factors controlling vulnerability to storm impacts along the Catalanian coast*. Proceedings International Conference of Coastal Engineering, Lisbona. Pp. 3087-3099.
- Regione Emilia-Romagna (2003) - *Studio di impatto ambientale. Riqualificazione funzionale del tratto costiero in corrispondenza di foce Bevano*. Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, Ravenna. Pp. 239.
- Saville T. (1954). *The effect of fetch width on wave generation*. U.S. Army Coastal Engineering Research Centre, Tech. Memorandum No. 70.
- Seymour R.J. (1977) - *Estimating wave generation on restricted fetches*. In: Journal of the Waterway Port, Coastal and Ocean Division, Proc. ASCE, No. 103.
- Sverdrup H.U. e Munk W.H. (1947) - *Wind, sea and swell; theory of relations for forecasting*. U.S. Navy Hydrographic Office, H.O., No. 601. Pp. 44.
- Vila - Concejo A., Matias A., Ferreira O., Duarte C. e Dias J.M.A. (2002) - *Recent evolution of the natural inlets of a barrier island system in Southern Portugal*. In: Proceedings of International Coastal Symposium, Journal of Coastal Research, SI 36: 741-752.

Ricevuto il 04/05/2007, accettato il 06/07/2007.

Caratterizzazione morfologico-dinamica e meteomarina della costa molisana nel settore compreso tra la foce del torrente Sinarca e Campomarino Lido (Molise, Italia meridionale)

Pietro Patrizio **Ciro Aucelli**¹, Tommaso **De Pippo**², Emanuela **Iannantuono**¹
e Carmen **Maria Roskopf**¹

¹Dipartimento S.T.A.T., Università degli Studi del Molise, Contrada Fonte Lappone - 86090 Pesche.

²Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Napoli Federico II,
Largo San Marcellino, 10 - 80138 Napoli.

Riassunto

La costa molisana è interessata da una prevalente tendenza all'arretramento che si è delineata marcatamente nel corso degli ultimi cinquanta anni. Le cause di tale tendenza non sono ancora ben chiare, e in particolare non sono disponibili ad oggi dati che consentano di valutare le possibili influenze climatiche. Il presente lavoro, pertanto, si è posto l'obiettivo di indagare sui rapporti tra dinamica costiera e parametri meteomarini e, in particolare, sulla possibile influenza di questi ultimi sulle recenti tendenze evolutive della linea di costa. A tal fine, è stato effettuato uno studio di dettaglio del settore costiero compreso tra la foce del torrente Sinarca e Campomarino Lido. Lo studio condotto ha consentito di caratterizzare tale settore dal punto di vista morfologico-dinamico e meteomarina, e di distinguerlo in tre tratti in base alla tendenza evolutiva recente ricostruita per ciascuno di essi. I dati acquisiti hanno permesso di evidenziare una stretta relazione tra regime ondoso e quello anemologico e una diversa sensibilità dei tratti distinti all'azione del moto ondoso e conseguente *drift* litoraneo, tale da suggerire una probabile relazione tra tendenze evolutive dei vari tratti e locali condizioni meteomarine. Lo studio ha permesso, inoltre, di accertare importanti variazioni del regime anemologico a partire dalla metà degli anni '70. Queste variazioni, consistenti in un incremento significativo delle frequenze dei venti dominanti e regnanti provenienti dagli ottanti settentrionali e in una recentissima riduzione delle frequenze delle calme, hanno portato ad una maggiore esposizione del settore costiero esaminato all'azione delle ondate principali e quindi ad un incremento delle sue condizioni di rischio di erosione.

Parole chiave: morfologia costiera, dinamica litorale, erosione, clima meteomarina, Molise, Italia.

Abstract

Since about at least 50 years, the Molise coast is affected by a marked and prevailing tendency to shoreline recession. The causes of such a tendency aren't still clear, and on particular there aren't available data which allow to evaluate possible climate influences. Aim of the present paper is therefore to investigate the possible relationships between coastal dynamics and meteomarine parameters, and to ascertain the possible influence of the latter on recent shoreline trends. Thus, a detailed study has been carried out for the coastal sector located between the mouth of the Sinarca torrent and Campomarino Lido. This study has allowed to characterise the studied coastal sector in relation to its morphological and meteomarine features and to distinguish it, with reference to recent shoreline trends, into three reaches. It furthermore permitted to put in evidence the strong relationship between wind and wave regimes, and the different incidence of wave action due to local meteomarine conditions which, in our hypothesis, have controlled the shoreline tendencies of each reach. Furthermore, important changes of the wind regime, occurred from the mid-70s onwards, have been reconstructed. Said changes consist mainly in an increase of the frequency of northern winds and a very recent but significant decrease of calms, which altogether have caused a major sensibility of the examined coastal sector to main waves and related littoral currents, and, consequently, an increase of erosion risk.

Keywords: *coast morphology, littoral dynamics, erosion, meteomarine climate, Molise, Italy.*

Introduzione

La costa molisana ha una lunghezza di circa 36 km ed è delimitata a nord dallo sbocco del canale del Formale del Molino (Fig. 1) e a sud dalla foce del torrente Saccione. Complessivamente, conserva un orientamento prevalente ca. NW-SE ed è riferibile (Girardi et al., 1985a, 1985b) ad un'unica grande unità fisiografica, delimitata a nord da P.ta Penna e a sud da P.ta Pietre Nere (Fig. 1).

I maggiori corsi d'acqua che sfociano lungo il litorale molisano sono i fiumi Trigno e Biferno ed i torrenti Sinarca e Saccione. I loro apporti alle foci sono prevalentemente pelitico-sabbiosi, essendo i loro bacini idrografici impostati in prevalenza su terreni arenaceo-marnosi e pelitico-argillosi e solo subordinatamente su terreni carbonatici (Aucelli et al., 2004).

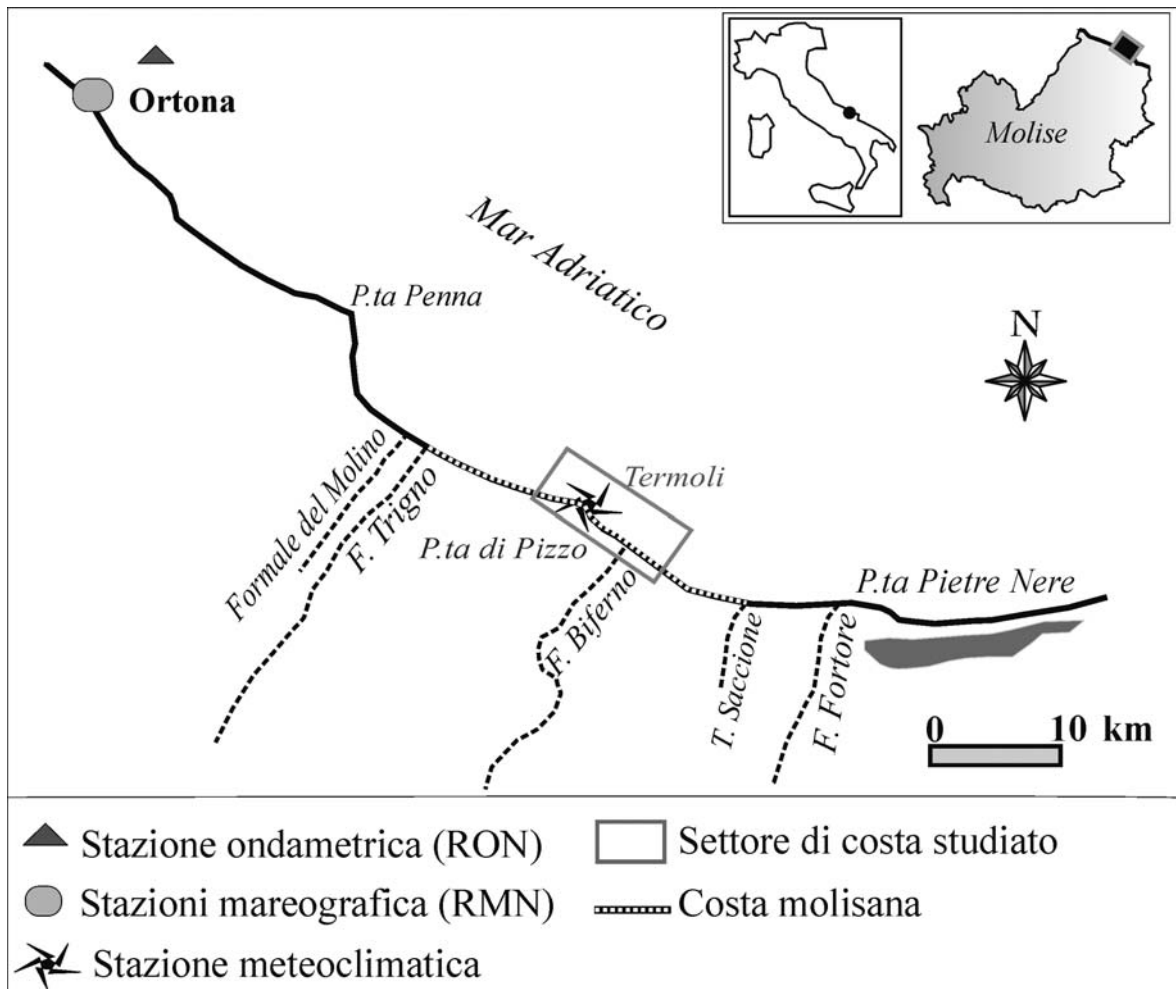


Figura 1 - Ubicazione della costa molisana e del settore costiero studiato.

Il litorale molisano è caratterizzato dall'alternarsi di tratti di costa bassa e di costa alta. La costa alta è presente tra la foce del Sinarca e Punta Pizzo (Fig. 1) ed è caratterizzata da una tipica morfologia a terrazzo (Zunica, 1987) dove si distinguono vari ordini di terrazzi quaternari impostati su sedimenti sabbioso-pelitici di ambiente marino e su depositi sabbiosi e ciottolosi di ambiente litorale ed alluvionale (Parea, 1978). Le superfici terrazzate più esterne sono delimitate verso la costa da scarpate di erosione

marina alte fino ad una trentina di metri, oggi inattive e in posizione leggermente arretrata rispetto alla linea di costa.

I tratti di costa bassa, caratterizzati da quote generalmente sui 4-5 m, comprendono, oltre alle piccole pianure alluvionali costiere costruite dai principali corsi d'acqua, una fascia litorale più o meno ampia antistante i rilievi collinari costituita, oltre che dal sistema spiaggia-duna attuale, da sistemi dunali da storici a recenti e relative aree sia intra- che retrodunali, topograficamente più depresse.

Come hanno evidenziato alcuni recenti studi (Iannantuono, 2002; Aucelli et al., 2004; Iannantuono et al., 2005; Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero, 2006) l'evoluzione della costa molisana nel corso dell'ultimo secolo è stata dominata da una prevalente tendenza all'arretramento. L'erosione ha interessato soprattutto i tratti costieri che includono le principali foci fluviali, dove sono stati misurati i valori massimi di arretramento, causando nel corso della prima metà del secolo scorso lo smantellamento completo delle morfologie a cuspidate che caratterizzavano le foci dei fiumi Trigno e Biferno, ed un arretramento prevalente e persistente della linea di costa nel cinquantennio successivo.

Circa le cause di tale arretramento, l'esame di una serie di possibili fattori di controllo suggerisce fortemente la sovrapposizione di fattori climatici ed antropici (Aucelli e Roszkopf, 2000; Aucelli et al., 2004). Tra i secondi sono da inserire in particolare le sistemazioni idraulico-forestali dei bacini fluviali, le estrazioni in alveo, il progressivo abbandono delle aree agricole e la conseguente re-stabilizzazione di coperture vegetali permanenti, nonché la realizzazione dell'invaso artificiale di Ponte Liscione, che nell'insieme hanno fortemente contribuito ad una diminuzione progressiva degli apporti sedimentari in generale, e delle frazioni sabbiose e ghiaiose in particolare, alle principali foci.

Riguardo invece i fattori climatici, se si prescinde dalla recente tendenza all'innalzamento del livello del mare (Antonioli, 2000), per ora ancora difficile da valutare sia nella sua entità che influenza sui processi di erosione costiera, un ruolo importante assume sicuramente la diminuzione delle portate liquide e solide dei fiumi italiani documentata da Vittorini (1991) per il periodo dal 1921 al 1973. Questa diminuzione viene imputata ad un decremento degli afflussi meteorici (confermato anche dai dati riportati in Aucelli e Roszkopf (2000) per il bacino del fiume Trigno), e alla diminuzione della frequenza di eventi di piena di una certa portata (500 m³/s per i maggiori corsi d'acqua italiani), capaci cioè di portare ad una percentuale apprezzabile la frazione sabbiosa del carico solido.

La risposta del sistema costiero, ovviamente, potrebbe dipendere non soltanto dai fattori appena menzionati, ma essere influenzata ancora da altri fattori che attualmente, per mancanza di dati, non trovano considerazione. Il presente lavoro, pertanto, si è posto l'obiettivo di indagare, attraverso uno studio di dettaglio di un settore costiero prescelto, sui possibili rapporti tra dinamica costiera e parametri meteo-marini, e sulla possibile influenza locale di questi ultimi sulla evoluzione della linea di costa.

Inquadramento geologico e geomorfologico dell'area di studio

Il settore costiero preso in esame è compreso tra la foce del torrente Sinarca e l'inizio dell'abitato di Campomarino Lido (Fig. 1). Questo settore, dalla lunghezza complessiva di ca. 10 km, è stato suddiviso in tre tratti (A, B e C, Fig. 2) in base alla recente tendenza evolutiva ricostruita per ciascuno di essi. Il tratto A è lungo ca. 3 km e si estende dalla foce del torrente Sinarca fino al promontorio di Termoli; questo tratto si caratterizza per la presenza di due spiagge (Foce dell'Angelo e S. Antonio, Fig. 2) ad elevato valore turistico, e per le sue discrete condizioni di stabilità, con tratti in leggero avanzamento ed altri in arretramento. Tuttavia, molto recentemente la spiaggia di S. Antonio appare essere interessata da un fenomeno di arretramento locale piuttosto spinto, per ora non facilmente inquadrabile in termini di tendenza (AA.VV., 2005; AA.VV., 2006). Il tratto B si estende per quasi 2,5 km dal molo sud del Porto di Termoli fino a P.ta Pizzo e comprende la spiaggia di Rio Vivo che, contrariamente a quanto osservato per molti altri tratti della costa molisana di costa, risulta essere in progressivo avanzamento (Aucelli et al., 2004; AA.VV., 2005). Il tratto C, infine, si estende per circa 4,5 km da P.ta Pizzo fino all'inizio dell'abitato di Campomarino e comprende le spiagge di Marinelle e la foce del fiume Biferno; questo tratto è caratterizzato da una tendenza pronunciata all'arretramento, solo localmente attenuata dalle difese costiere realizzate durante gli ultimi decenni.

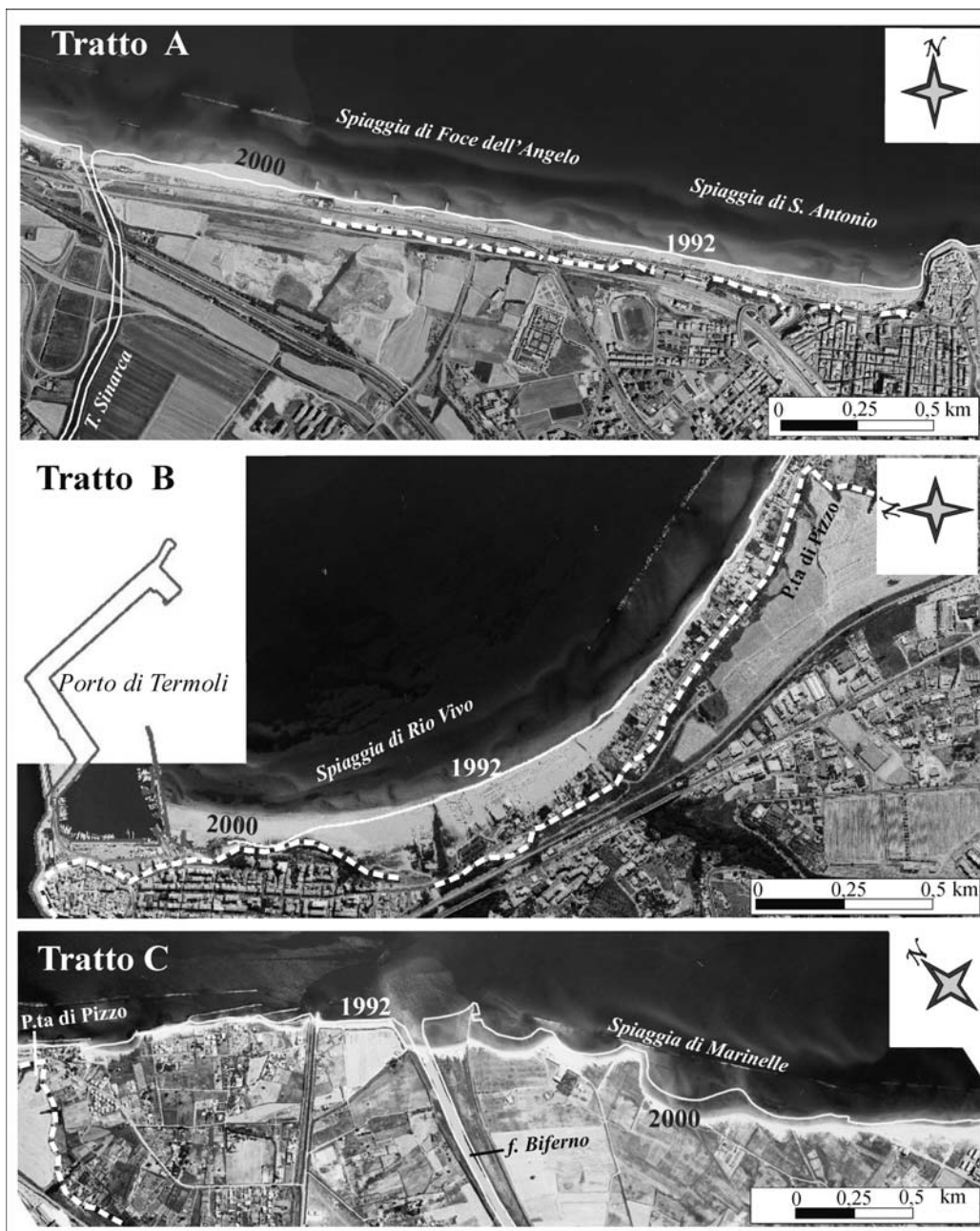


Figura 2 - Inquadramento dei tre tratti costieri A (a), B (b) e C (c) costituenti il settore costiero studiato, che consente anche il confronto tra le linee di riva relative al 1992 e al 2000. Con la linea bianca a tratteggio è indicato l'orlo superiore della falesia che delimita i tratti a costa alta.

I tratti A e B sono caratterizzati da una prevalente morfologia a costa alta a terrazzo che risulta delimitata da una falesia posta ad una distanza compresa tra poche decine di metri (lungo il promontorio di Termoli) e 500 m circa dall'attuale linea di costa, lasciando così spazio alla spiaggia attuale ed i retrostanti sistemi dunali da storici ad attuali. La costa alta è impostata su formazioni riferibili al ciclo regressivo pliocenico-pleistocenico (Patacca et al., 1992). Queste formazioni, nel settore in sinistra del Sinarca sono rappresentate (Fig. 3) dalle *Argille di Montesecco* e dalle *Sabbie di Serracapriola* (Foglio n. 148 della Carta Geologica d'Italia). La prima for-

mazione è costituita da terreni prevalentemente argillosi, la seconda da termini sabbioso-arenacei. Nel settore in destra del Sinarca sono presenti le formazioni delle *Sabbie di Serracapriola* e dei *Conglomerati di Campomarino* (Foglio n. 153 della Carta Geologica d'Italia), caratterizzate nell'insieme da terreni prevalentemente sabbiosi e conglomeratici. Le formazioni plio-pleistoceniche risultano ricoperte in modo discontinuo da terreni alluvionali, non riportati per motivi di scala nello schema geolitologico della Figura 3. Il tratto C è caratterizzato da una morfologia di costa bassa, ed è largamente dominato dall'ampia piana deltizia del Biferno.

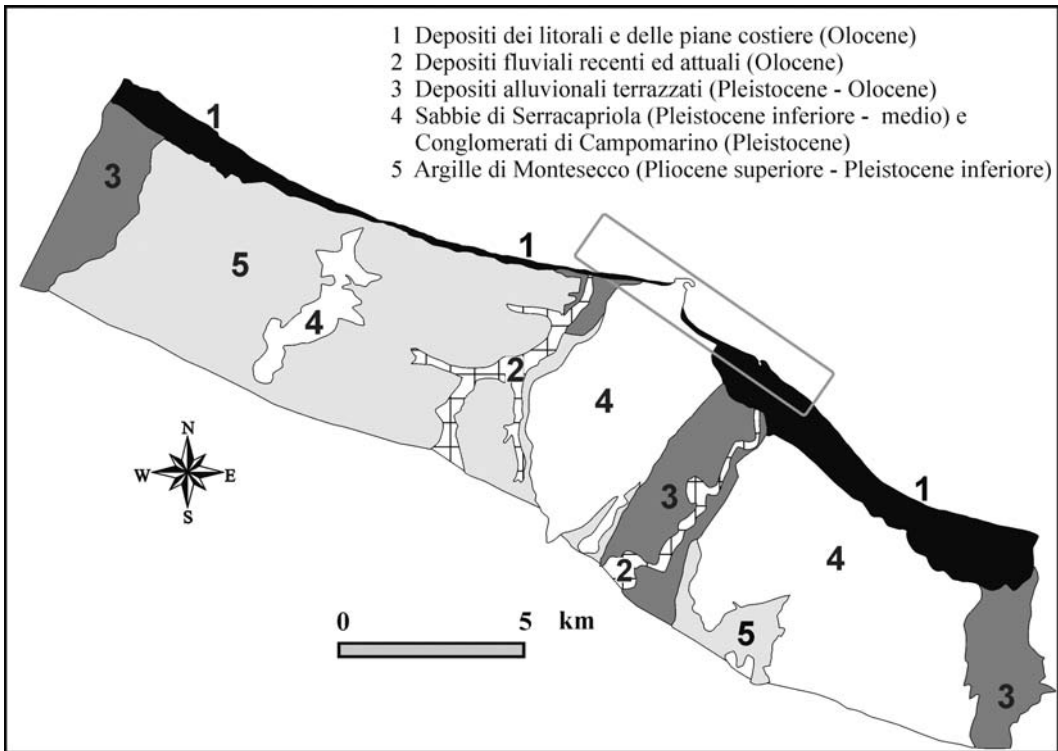


Figura 3 - Schema geolitologico della fascia costiera molisana. Nel riquadro il settore costiero studiato.

Caratteristiche sedimentologiche della spiaggia emersa

Per giungere ad una preliminare caratterizzazione sedimentologica del settore costiero in esame sono stati effettuati nel 2005 primi prelievi di campioni sedimentologici lungo la spiaggia emersa. In particolare, sono stati prelevati nella zona di battigia ad una distanza media di ca. 800 m, 12 campioni di sedimento che sono stati poi sottoposti ad analisi sedimentologiche. In particolare, sono state effettuate, sulla base dei diagrammi e delle scale di Folk & Ward (1957), l'analisi granulometrica e la determinazione dei principali parametri statistici quali le frazioni percentuali e percentili, il granulo medio e la mediana (in mm), la deviazione standard, la curtosi, l'asimmetria e la classazione.

In Tabella 1 si trovano sintetizzati i principali parametri calcolati per i campioni raccolti, la cui numerazione è progressiva da nord verso sud e identificativa del tratto di provenienza: tratto A: campioni 1-3; tratto B: campioni 4-6; tratto C: campioni 7-12. I campioni presentano caratteristiche tessiturali abbastanza uniformi e corrispondono, ad eccezione del campione 4, a sabbie da fini a grossolane, con una netta prevalenza delle sabbie fini (campioni 1, 3, 5, 7, 8 e 11). Sabbie medie sono presenti sulla spiaggia di S. Antonio e nuovamente a sud della foce del Biferno (campioni 2, 9 e 10), sabbie grossolane invece all'estremità sud dei tratti B e C sulle spiagge di Rio Vivo e di Marinelle (campioni 6 e 12). Soltanto in sinistra della foce del Biferno, presso l'estremità nord della spiaggia di Rio Vivo, è stata rilevata la presenza di sabbie molto fini (campione 4). Quasi tutti i campioni sabbiosi sono risultati ben selezionati (da discretamente ad estrema-

mente classati) e in prevalenza quasi simmetrici. Tutti i campioni sono risultati unimodali, ad eccezione del campione 6 che è stato prelevato in sinistra del Biferno, presso il limite nord del tratto B. Inoltre, sono risultati tutti leptocurtici, ad eccezione di quelli prelevati in destra della foce del Biferno (campioni 9-12), e caratterizzati da una moda spiccata nel *range* di dimensioni tra 0,12 e 0,28 mm.

Tabella 1 - Sintesi dei principali parametri statistici calcolati per i campioni prelevati sulla spiaggia emersa nel settore costiero studiato.

Campione	Granulo medio (mm) e classificazione granulometrica		Classazione	Asimmetria
1	0,25	sabbia fine	estremamente classato	asimmetrica fine
2	0,50	sabbia media	ben classato	asimmetrica grossolana
3	0,22	sabbia fine	ben classato	quasi simmetrica
4	0,13	sabbia molto fine	estremamente classato	quasi simmetrica
5	0,13	sabbia fine	ben classato	quasi simmetrica
6	1,19	sabbia molto grossolana	mediocrementemente classato	fortemente asimmetrica grossolana
7	0,18	sabbia fine	discretamente classato	asimmetrica grossolana
8	0,19	sabbia fine	discretamente classato	asimmetrica grossolana
9	0,30	sabbia media	discretamente classato	quasi simmetrica
10	0,28	sabbia media	discretamente classato	quasi simmetrica
11	0,18	sabbia fine	ben classato	quasi simmetrica
12	0,57	sabbia grossolana	ben classato	quasi simmetrica

Caratteristiche sedimentologiche e morfologiche della spiaggia sommersa

I fondali antistanti la costa molisana sono generalmente bassi e caratterizzati da uno stile di sedimentazione ben noto nella maggior parte degli ambiti costieri sia dell'Alto che soprattutto del Medio Adriatico, in base al quale i sedimenti si dispongono a bande sub-parallele alla linea di riva. Dal punto di vista sedimentologico, questi fondali si caratterizzano per una prevalenza di sabbie fini (48%) e medio-fini (41%) (AA.VV., 2005) cui corrispondono, rispettivamente, applicando la formula modale di sintesi, diametri medi pari a 0,15 e 0,3 mm.

Per la caratterizzazione morfologica e sedimentologica di dettaglio della spiaggia sommersa del settore costiero in esame sono stati realizzati nel 2005, con una spaziatura di circa 500 m, diciassette profili batimetrici orientati ortogonali alla linea di costa ed estesi fino ad una profondità di 10 m (Fig. 4a). Di questi 17 profili, sette ricadono nel tratto A (A1-A7), uno soltanto nel tratto B (B1), dove l'avanzamento veloce della linea di costa e la conseguente bassa profondità del fondale non hanno consentito l'esecuzione di ulteriori profili, e nove nel tratto C (C1-C9). In base ai campioni prelevati lungo i profili è stata accertata la presenza esclusiva di sabbie, costituite in gran prevalenza da sabbie medie, medio-fini e fini, a conferma di una buona omogeneità granulometrica del fondale in esame. Il tratto A, in particolare, risulta essere caratterizzato da sabbie prevalentemente medie entro la profondità di 2 m, e fini a profondità maggiori. Nel tratto B, i campioni prelevati lungo il profilo e sul fondale circostante indicano una prevalenza di sabbie fini, e la presenza di una fascia larga circa 300 m ed allungata verso sud di sabbie medio-fini. Il tratto C, infine, è caratterizzato dalla presenza prevalente di sabbie fini. Sedimenti sabbiosi più grossolani, costituiti rispettivamente da sabbie medie e grossolane, si rinvennero in destra del Biferno all'esterno delle scogliere formando una fascia parallela alla costa lunga ca. 1,5 km, e alla foce del Biferno fino ad una profondità di 6 m.

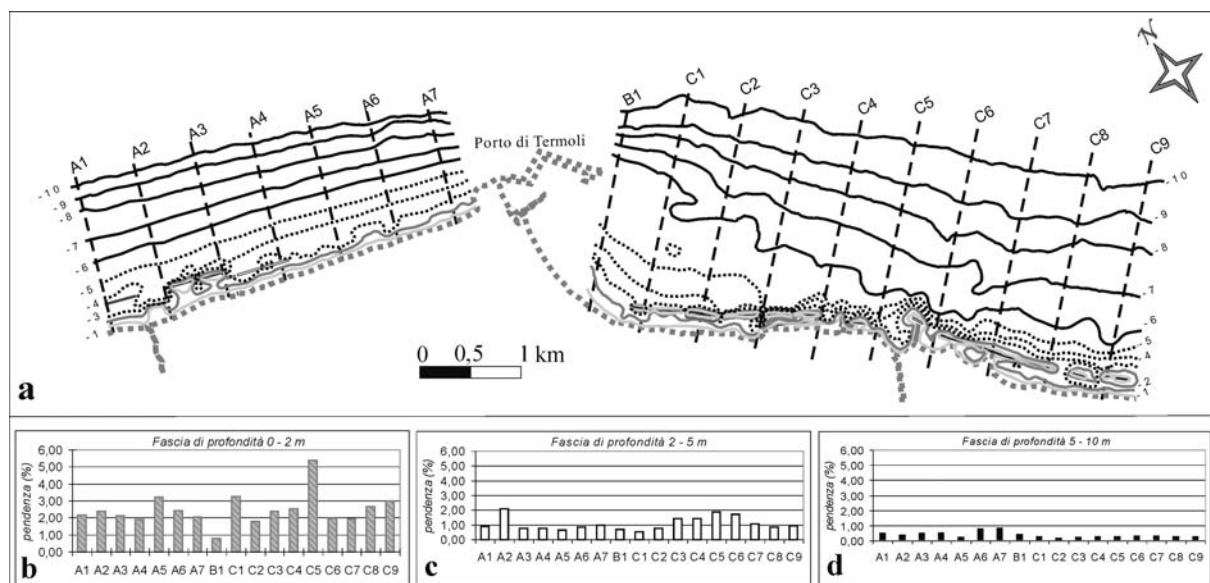


Figura 4 - Caratteristiche batimetriche del settore costiero studiato e localizzazione dei 17 profili batimetrici (a); pendenze percentuali ricostruite lungo i profili batimetrici per le fasce di profondità comprese tra 0 e 2 m (b), 2 e 5 m (c) e 5 e 10 m (d).

Ai fini della caratterizzazione morfologica della spiaggia sommersa, i profili ottenuti sono stati analizzati e poi confrontati con una serie di altri profili batimetrici riportati in vari studi (Carobene e Bramati 1975, 1977; Bondesan e Simeoni, 1983; Cipriani et al., 2001). Da tale confronto, in particolare, è emerso l'assenza, nei tratti A e C, di una morfologia a barre e truogoli che invece è stata rilevata in altri settori della costa molisana (ad es. lungo i fondali antistanti le spiagge del Litorale nord di Termoli, in sinistra del Sinarca, e di Nuova Cliternia, a sud del settore costiero in esame) non interessati da opere di protezione. Ciò porta ad ipotizzare che l'assenza di tale morfologia fosse collegata alla presenza di opere di difesa longitudinali nei tratti suddetti, ivi poste a profondità comprese tra 2/3 e 5 m, che tendono ad indurre modifiche agli schemi di circolazione nella fascia di fondale compreso tra la linea di battigia e l'isobata dei 5 m circa.

Il settore costiero in esame è coperto per il 70% da opere di protezione (Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero, 2006), costituite da barriere longitudinali e pennelli. In particolare, nei tratti A e C, la copertura da parte delle opere di difesa è ormai del 100%. Nel tratto A, tale copertura è molto recente se si considera che nel 2000 esisteva solo un paio di scogliere (Fig. 2a); sono presenti quasi esclusivamente scogliere emerse, disposte lungo un singolo allineamento. Nel tratto C, oltre ad una serie di pennelli, sono presenti scogliere emerse, staccate ed aderenti, più volte rifiorite, e disposte in più file circa parallele.

Come hanno evidenziato l'esame dei profili realizzati e le osservazioni compiute su recenti foto aeree ed immagini satellitari, i tratti di fondale posti entro i primi 3 metri di profondità - ricadenti solitamente nella fascia tra l'attuale linea di riva e le scogliere - sono caratterizzati dalla presenza di piccoli canali di flusso. La genesi di tali canali di flusso va collegata con ogni probabilità alle particolari condizioni di circolazione attorno alle scogliere (Balzano et al., 2005) e in particolare all'azione di correnti longitudinali e di ritorno prodotte a seguito dei fenomeni di frangimento e di tracimazione delle onde in corrispondenza delle stesse scogliere. All'azione delle stesse correnti andrebbe imputata l'osservata forte erosione localizzata delle scogliere che causa una loro progressiva destabilizzazione.

Ad evidenziare i fenomeni di erosione in atto e la conseguente tendenza alla destabilizzazione delle scogliere, sono anche le pendenze del fondale che sono state calcolate per ogni profilo per le seguenti fasce di profondità: 0-2 m, 2-5 m e 5-10 m (Fig. 4b-d). Sono stati innanzitutto individuati i profili caratterizzati nella fascia tra 0 e 2 m di profondità da una pendenza superiore all'1%, in quanto tale percentuale rappresenta un importante valore soglia fortemente indicativo di fenomeni di erosione più o meno spinti (Marabini, 2000). In particolare, per i profili A1-A7 e C1-C9 si sono ottenuti valori di pendenza media nettamente superiori all'1%, pari rispettivamente a 2,33 e 2,77%. Il profilo B1, invece, come era ovvio aspettarsi, man-

tiene in questa fascia di profondità un valore inferiore all'1%, pari cioè a 0,79%. Alcuni dei profili realizzati, pur non essendo interessati direttamente da alcuna opera di protezione, sono caratterizzati da pendenze comunque piuttosto elevate entro i 2 m di profondità (sempre superiori all'1%), a conferma delle condizioni di elevata dinamica e di erosione in atto. Per la fascia di profondità successiva (2-5 m), in tutti i tre tratti si osserva una diminuzione delle pendenze, di entità molta modesta per il tratto B, ma molto consistente nei tratti A e C dove si registrano rispettivamente pendenze comprese tra ca. 0,7 e 2,1% e 0,5 e 2,0% (Fig. 4c), cui corrisponde una pendenza media rispettivamente di 1,0 e 1,2%. Nella fascia di profondità tra i 5 e 10 m, infine, si nota un ulteriore notevole abbassamento delle pendenze medie nei tratti A e C, che sono pari rispettivamente a 0,6 e 0,5% (Fig. 4d). Considerando, invece, come un'unica fascia di profondità quella compresa tra la battigia e l'isobata dei 5 m, si registrano pendenze medie rispettivamente per A e C di 1,2 e 1,5%. Confrontando queste pendenze con quelle estratte dall'Atlante delle spiagge (Girardi et al., 1985a, 1985b) e riportate in Figura 5, si nota una buona coincidenza per il tratto A (1,2%), una pendenza media invece nettamente superiore nel tratto C (1,5 rispetto allo 0,5%) e indicativa, presumibilmente, proprio dei fenomeni di destabilizzazione avvenuti nel corso dell'ultimo ventennio.

Caratterizzazione del clima meteomarina

Caratteristiche del moto ondoso

Il settore costiero in esame ricade nel settore di traversia compreso tra i 310°-110°N (Fig. 5), le cui direzioni si appoggiano rispettivamente su Punta Penna e Punta Pietre Nere (Fig. 1). Di tale settore di traversia, tuttavia, ai fini della propagazione sotto costa, viene considerato soltanto il settore compreso tra i 350 e 95° N. Ciò, in quanto, come hanno evidenziato alcuni studi precedenti che si sono occupati della ricostruzione, tramite modelli, del moto ondoso lungo il litorale molisano (Assessorato ai Lavori Pubblici della Regione Molise, 2001), si deve tener conto di un restringimento del paraggio sottocosta perché i mari provenienti dai sub-settori 310°N-350°N e 95°N-110°N vengono deviati per effetto della rifrazione e quindi non raggiungono, in corrispondenza dei bassi fondali, il litorale in questione. Pertanto, per il presente lavoro, viene fatto riferimento alle direzioni del moto ondoso comprese tra 350°N e 95°N. Il promontorio di Termoli costituisce un chiaro elemento di separazione, rafforzato dalla struttura del porto, che porta a dividere il settore costiero in esame in due sub-unità orientate, rispettivamente, in direzione prevalente ca. WNW-ESE e NW-SE (Fig. 5).

Per la caratterizzazione del moto ondoso sono stati utilizzati i dati forniti dal Servizio Mareografico dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT) relativi alle registrazioni effettuate dalla boa ondometrica direzionale posta al largo di Ortona (Fig. 1). L'analisi dei dati reperiti, relativi al periodo 1990-2003, ha compreso il calcolo delle frequenze delle direzioni (°N), dell'altezza (m) e dell'energia (N/m) delle onde per ogni direzione di ampiezza pari a 45° inclusa nel settore di traversia principale.

Il calcolo delle frequenze percentuali delle altezze d'onda per settori di provenienza è stato realizzato considerando le classi di altezza indicate dalla scala Douglas relativa allo stato del mare.

In base alla relazione esistente tra altezza ed energia dell'onda, sono state create delle classi di altezza d'onda per ognuna delle quali è stato calcolato un valore minimo e massimo di energia (N/m).

I risultati ottenuti evidenziano che le onde prevalenti provengono dai quadranti settentrionali. Le onde con altezza superiore a 1 m (Fig. 6a) provengono prevalentemente da 23°N (12%), 90°N (9%) e 344°N (15%). Per altezze d'onda maggiori di 2 m (Fig. 6b) il campo direzionale delle onde diventa molto più selettivo e si nota un aumento della frequenza, pari a circa l'11%, delle onde provenienti da 23°N ed una riduzione del 10% per le onde provenienti da 90°N. Per altezze d'onda maggiori di 3 m il 40% delle onde proviene dalla direzione 1-45°N (Fig. 6c).

Per le onde prevalenti è stato effettuato il calcolo del campo di energia sulla base della relazione esistente tra altezza delle onde ed energia. Dal calcolo del campo di energia per settori di provenienza (Fig. 7a) emerge che i valori massimi di densità totale di energia possono essere associati ad un campo direzionale compreso tra 316°N e 45°N che corrisponde al campo direzionale delle onde a maggiore altezza. Le onde provenienti da queste direzioni sono caratterizzate da un periodo medio di 3-4s e massimo compreso tra 7,6 e 10 s, da una lunghezza media di 129 m e massima di 200 m, e da valori di altezza compresi tra 4 e 6 m.

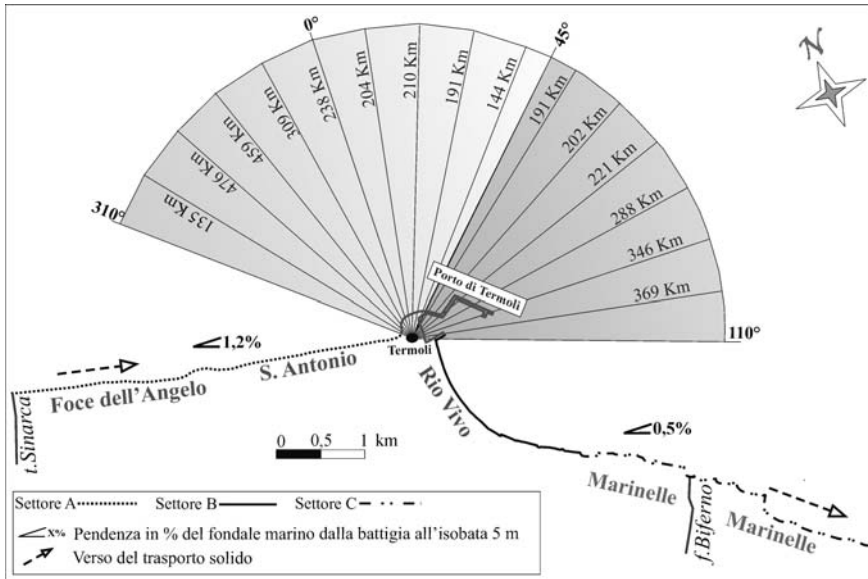
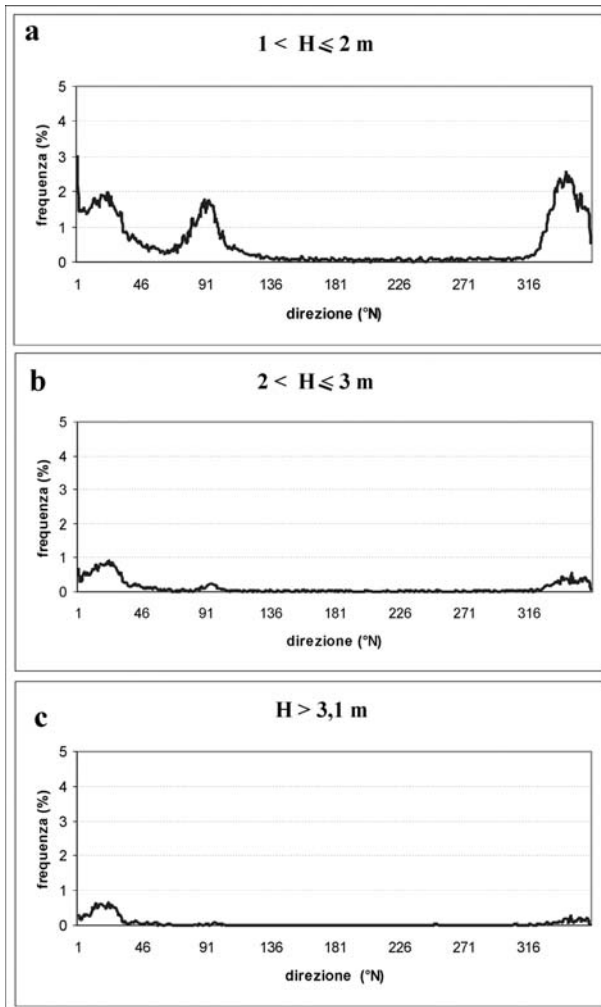


Figura 5 - Visualizzazione del settore di traversia in cui ricade il settore costiero in esame con l'indicazione del verso del trasporto sedimentario lungo costa e della pendenza del fondale tra 0 e 5 m di profondità rispettivamente a nord e a sud del promontorio di Termoli.



I dati acquisiti evidenziano, inoltre, che alle onde provenienti dal I ottante (1-45°N) sono associati valori più elevati di energia pari a circa 30.000 N/m, contro i 20.000 N/m associati alle onde provenienti dal VIII ottante (Fig. 7a). In termini di frequenza risulta che le ondazioni prevalenti con energia inferiore a 1,2 N/m corrispondono rispettivamente a 350°N e 6°N con valori di frequenza percentuale rispettivamente pari a 15% e 12%. Per classi di energia superiori a 1,2 N/m e altezze d'onda superiori a 1 m, la frequenza percentuale delle onde con direzione media di 23°N raggiunge il 24% contro il 10% delle onde provenienti da 350°N. Da ciò si deduce che le onde con altezza superiore a 1 m sono molto frequenti e provengono prevalentemente dal I ottante (0-45°N).

Per determinare la variabilità del fattore energetico nel tempo è stata calcolata la densità totale di energia per ogni anno. I risultati ottenuti (Fig. 7b) mostrano un valore minimo registrato nel 2000, seguito da valori crescenti negli anni successivi fino a raggiungere il valore massimo nel 2003 pari a ca. 10.000 N/m. Un valore di densità totale di energia piuttosto elevato (7.500 N/m) è stato calcolato anche per il 1995, caratterizzato da un evento di mareggiata del tutto eccezionale; questo evento di mareggiata, avvenuto il 28 maggio, è riferibile al campo direzionale delle onde a maggiore altezza compreso tra 316-45°N e si è distinto per l'altezza eccezionale delle onde pari a 6,2 m, massima per l'intero periodo indagato.

Figura 6 - Distribuzione delle frequenze percentuali delle onde per settori di provenienza (45°) e altezze delle onde comprese tra 1 e 2 m (a), 2 e 3 m (b) e > 3 m (c).

Caratteristiche anemometriche

Per la caratterizzazione anemometrica del settore costiero in esame sono stati utilizzati i dati registrati nel periodo compreso tra il 1953 e 2003 dall'anemografo della stazione climatica dell'Aeronautica Militare posizionata sul castello di Termoli (Fig. 1).

L'elaborazione dei dati è stata effettuata considerando le stesse classi di direzione usate per la caratterizzazione del moto ondoso (settori di 45°, ottanti).

L'elaborazione dei dati relativi alle intensità dei venti è stata eseguita adottando le classi specificate nella scala di Beaufort (Bascom, 1965; Komar, 1998; Pranzini, 2004).

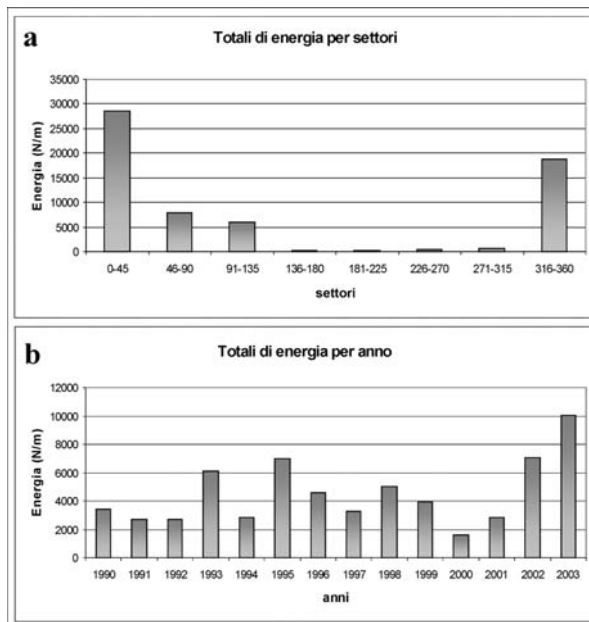


Figura 7 - Distribuzione dei valori di energia delle onde (in N/m) per anno (a) e per settori di provenienza (b).

Dall'elaborazione della serie anemometrica emerge (Fig. 8a) che i venti più frequenti sono quelli settentrionali, provenienti cioè dal I (0-45°N) e VIII ottante (315-360°N). Per l'intero periodo studiato i venti provenienti dal I ottante hanno una maggiore frequenza dei venti provenienti dal VIII ottante di circa il 10% (fatta eccezione per i periodi 1953-1956 e 1998-2003 in cui si verifica il caso opposto) e quindi rappresentano i venti regnanti (Fig. 8b). Come illustrato in Figura 9, con l'aumento dell'intensità dei venti, passando cioè da condizioni di Brezza tesa (11-16 nodi) a quelle di Burrasca (41-47 nodi), i venti cui si associano valori di intensità più alti sono quelli provenienti dal VIII ottante (316-360°N), che risultano essere caratterizzati da valori di frequenza maggiori del 50% per ognuna delle classi di intensità studiate. Ciò consente di affermare che i venti provenienti dal VIII ottante risultano essere i più intensi e dunque possono essere considerati dominanti perché caratterizzano in termini di intensità il regime anemometrico della costa molisana. I venti regnanti e dominanti non hanno alcun carattere stagionale, in quanto la loro frequenza di apparizione è costante in tutte e quattro le stagioni.

L'analisi della frequenza dei venti settentrionali, provenienti cioè dal I e VIII ottante, per singole classi di intensità porta ad individuare nella serie 1953-2003 due periodi (1953-1975 e 1976-2003) che, messi a confronto (Tab. 2), mostrano chiaramente gli aumenti di frequenza spesso consistenti di tali venti nel secondo periodo.

L'analisi della frequenza dei venti settentrionali, provenienti cioè dal I e VIII ottante, per singole classi di intensità porta ad individuare nella serie 1953-2003 due periodi (1953-1975 e 1976-2003) che, messi a confronto (Tab. 2), mostrano chiaramente gli aumenti di frequenza spesso consistenti di tali venti nel secondo periodo.

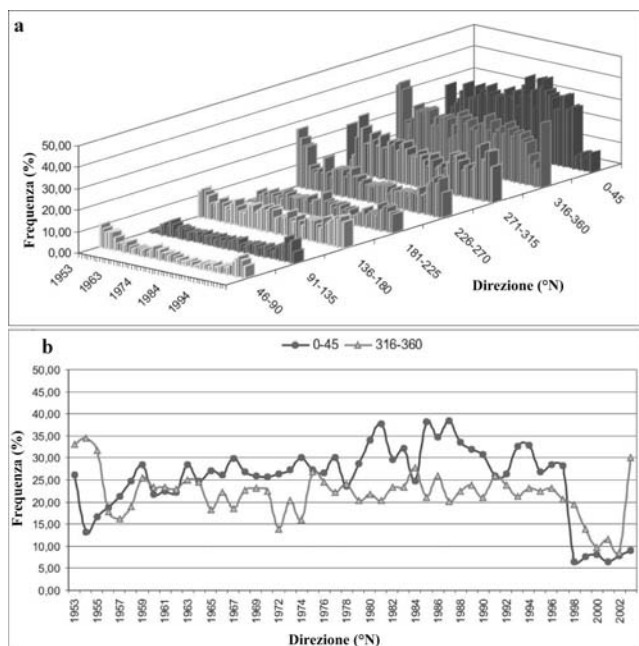


Figura 8 - a) Frequenze percentuali annuali dei venti per settori di provenienza con ampiezza di 45° (ottanti) durante il periodo 1953-2003; b) confronto tra le frequenze percentuali dei venti provenienti dal I (0-45°N) e dal VIII ottante (316-360°N).

Questi aumenti interessano in modo significativo le classi di intensità a partire dai 17 nodi, e le variazioni percentuali più consistenti superano in alcuni casi addirittura il 12%. In particolare, gli aumenti di frequenza per i venti provenienti dal I ottante (Tab. 2a) appaiono significative e di crescente consistenza a partire da intensità di 22 nodi, mentre quelli dei venti provenienti dal VIII ottante (Tab. 2b) risultano essere molto consistenti nell'intervallo di intensità comprese tra 17 e 33 nodi. Molto importante appare anche la comparsa, nel secondo periodo, di venti provenienti dal I ottante aventi intensità comprese tra 48 e 55 nodi, che raggiungono una frequenza media di 10,71%, e l'aumento notevole in contemporaneo dei venti provenienti dal VIII ottante per le stesse intensità, cui corrisponde una variazione percentuale addirittura del 12,73%.

Un altro risultato importante è emerso dall'analisi della frequenza dei venti aventi intensità inferiori a 1 nodo e classificati come calme di vento nella scala di Beaufort. Confrontando, infatti, i due periodi, si osserva una diminuzione complessiva della frequenza percentuale dell'1% (Tab. 2c) che, se da un lato appare molto modesta, dall'altro lato assume una grande importanza se si considera che essa è interamente imputabile alle elevate variazioni negative di frequenza avvenute nel breve periodo 1998-2003.

In questo periodo, infatti, le frequenze delle calme di vento si mantengono addirittura a valori inferiori al 5%, quindi molto basse se confrontati con quelle degli anni precedenti, sempre riferibili al periodo 1976-2003, comprese tra il 20 e poco più del 30%.

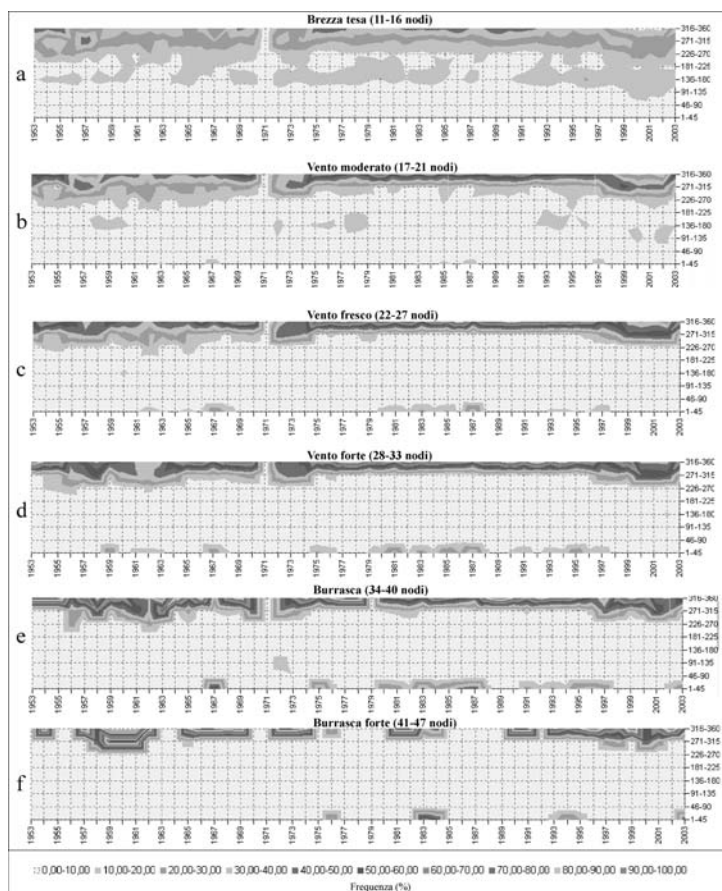


Figura 9 - Frequenza percentuale delle intensità dei venti per settori di provenienza e classi di intensità: a) 11-16 nodi; b) 17-21 nodi; c) 22-27 nodi; d) 28-33 nodi; e) 34-40 nodi; f) 41-47 nodi.

a			
I ottante (0 - 45°N)			
Forza (nodi)	frequenza media (%)		totale
	1953-1975	1976-2003	%
4-6	6,42	6,29	-0,13
7-10	3,89	4,27	0,38
11-16	3,55	3,83	0,28
17-21	5,32	6,32	1,00
22-27	8,34	10,61	2,27
28-33	12,36	16,72	4,36
34-40	18,87	26,84	7,97
41-47	2,03	9,78	7,75
48-55	0,00	10,71	10,71

b			
VIII ottante			
Forza (nodi)	frequenza media (%)		totale
	1953-1975	1976-2003	%
4-6	17,95	14,90	-3,04
7-10	21,87	20,06	-1,80
11-16	32,85	33,86	1,02
17-21	44,10	52,33	8,23
22-27	53,53	65,58	12,05
28-33	59,47	68,74	9,27
34-40	64,33	68,20	3,87
41-47	48,52	49,34	0,82
48-55	8,70	22,41	13,72

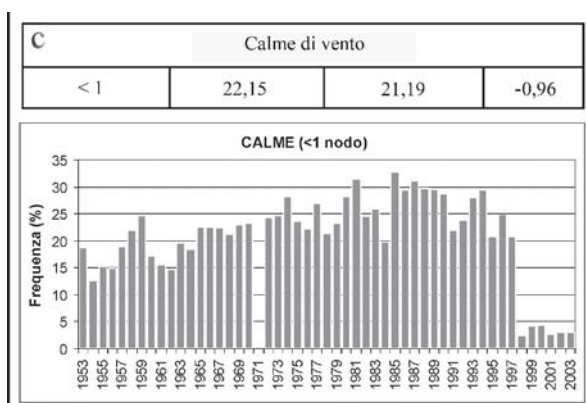


Tabella 2 - Frequenze percentuali, per varie classi di intensità, dei venti provenienti dal I (a) e dal VIII ottante (b) e delle calme di vento (c) nei due periodi considerati (1953-1975 e 1976-2003) e relative variazioni percentuali (in alto).

Emerge, quindi, in sintesi, oltre alla recente riduzione delle frequenze delle calme di vento, un consistente aumento, nel corso degli ultimi trenta anni circa, delle frequenze e delle intensità massime dei venti settentrionali. Simili variazioni del regime anemometrico sono state riscontrate da Pirazzoli e Tomasin (2003) che mettono in evidenza un aumento dell'intensità dei venti provenienti da NE per la stazione di Termoli, lungo il litorale calabro (D'Alessandro et al., 1982; 2002), sulla costa occidentale francese (Pirazzoli et al., 2003), dove è stato osservato un aumento della velocità del vento relativo ai quadranti settentrionali a partire dal 1975, ma anche nell'intera area mediterranea occidentale (Metaxas, 1991) e nel Nord Atlantico (Werner et al., 2000).

Come già dimostrato da vari autori (Bascom, 1965; Komar, 1998; Pranzini, 2004), la componente energetica delle onde è fortemente influenzata dal vento e in particolare dalla sua intensità. Al fine di verificare il grado di correlazione esistente tra altezze delle onde ed intensità dei venti è stato effettuato il calcolo dell'indice di correlazione tra i dati ondametrici e mareografici registrati nel periodo 1990-2003 rispettivamente dalle stazioni ondometrica e mareografica di Ortona. Tale indice è risultato pari a 0,8, a conferma di un buon grado di correlazione tra i due parametri presi in esame.

Successivamente, i dati ondametrici della stazione di Ortona sono stati confrontati con i dati anemometrici della stazione di Termoli. Il confronto è stato effettuato sempre per il periodo 1990-2003 per il quale entrambe le stazioni hanno fornito regolari registrazioni. L'indice di correlazione ottenuto è particolarmente alto per i venti provenienti dai quadranti settentrionali ed è risultato pari a 0,9 per venti con intensità superiori ai 30 nodi e pari a 0,7 per venti con intensità inferiori ai 30 nodi.

Evoluzione recente della linea di riva

La costa molisana, come già accennato in precedenza, è stata interessata nel corso dell'ultimo secolo da un cospicuo arretramento della sua linea di riva che ha interessato soprattutto i settori che includono le principali foci fluviali.

Nell'ambito del presente lavoro è stata effettuata una ricostruzione dettagliata della evoluzione recente della linea di riva nel settore costiero preso in esame, e quindi dei singoli tratti distinti. A tal fine è stata effettuata la digitalizzazione delle varie linee di riva ricostruite in base alla carta topografica I.G.M.I. in scala 1:25.000 del 1954, alla Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000 del 1992, alle ortofoto dell'A.I.M.A. del 1997 in scala 10.000 e, infine, alle foto aeree in scala 1:13.000 della R.T.A. del 2000. E' stata quindi effettuata una analisi comparativa, in ambito GIS, delle varie linee di costa ricostruite. Essendo i supporti cartografici, le ortofoto e le foto aeree, messi a confronto e sovrapposti alle carte topografiche dell'I.G.M.I., a grande scala (≥ 13.000), è possibile stimare pari a 5 m l'errore massimo nella localizzazione della linea di costa dovuta ad eventuali difficoltà visive dell'operatore. Tale valore appare molto ridotto se confrontato con le variazioni lineari calcolate per i vari periodi distinti (vedi oltre), e non influisce, quindi, in modo significativo sulle varie tendenze ricostruite.

Procedendo con un passo di misura di 100 m, sono stati calcolati per i tre tratti A, B e C per i periodi 1954-1992, 1992-1997 e 1997-2000 sia gli spostamenti lineari della linea di costa, sia le relative variazioni areali negative e positive, corrispondenti cioè alle superfici perse a seguito dell'arretramento della linea di costa oppure aggiunte a seguito dell'avanzamento della stessa.

Per quanto riguarda il periodo 1954-1992, i risultati ottenuti (Fig. 10a) confermano le ricostruzioni precedenti (Iannantuono, 2002; Aucelli et al., 2004; Iannantuono et al., 2005; Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero, 2006) che vedono soprattutto i tratti costieri includenti le principali foci fluviali maggiormente interessati da erosione. Mentre il tratto B mostra una netta tendenza all'avanzamento, i tratti A e C mostrano notevoli arretramenti che raggiungono valori massimi di circa 260 m nel tratto C cui corrisponde un tasso annuale di ca. 6,5 m/a.

Circa l'evoluzione più recente del settore costiero in esame, i due periodi successivi distinti (1992-1997 e 1997-2000, Fig. 10, b e c) confermano le tendenze precedentemente rilevate per i tratti B e C, caratterizzati dal permanere della tendenza rispettivamente alla progradazione e all'erosione.

Nel tratto C, in particolare, si registrano dei tassi di erosione annua molto elevati, nettamente superiori a quelli calcolati per il primo periodo, e pari rispettivamente a ca. 40 e 16 m/a, cui corrispondono arretramenti massimi di ca. 200 m e 50 m nell'area di foce del Biferno. Il tratto A, invece, mostra una inversione di tendenza abbastanza netta, suddividendosi in piccoli tratti alternativamente interessati da avanzamento e erosione, così da approssimare complessivamente condizioni di sostanziale stabilità per quanto riguarda gli ultimi 8 anni considerati.

Facendo un bilancio delle variazioni areali avvenute complessivamente nell'intero periodo 1954-2000, risultano in erosione i tratti A (spiaggia di Foce dell'Angelo e di S. Antonio) e C (spiagge di Marinelle) per i quali sono state calcolate delle superfici erose di rispettivamente 12.000 e 585.000 m². Da una netta variazione positiva di superficie, pari a 118.614 m², è stato invece interessato il tratto B.

Complessivamente, il settore costiero studiato è interessato da significativi processi di erosione, molto più pronunciati nel tratto C che non nel tratto A. Questo ultimo, infatti, nel complessivo periodo indagato, è caratterizzato da una sostanziale stabilità, che soltanto molto recentemente, a seguito dei fenomeni di erosione che si registrano da pochi anni in corrispondenza della spiaggia di S. Antonio (AA.VV., 2005; Iannantuono et al., 2005; AA.VV., 2006) sta lasciando spazio ad una crescente instabilità.

Per proteggere il litorale dai fenomeni erosivi sono state realizzate, nel corso degli ultimi venti anni in particolare, numerose opere di difesa sia longitudinali che trasversali, che nel settore costiero in esame si trovano localizzati in particolare lungo le spiagge di Foce dell'Angelo, di S. Antonio, di Rio Vivo e di Marinelle. Allo stato attuale, tuttavia, le opere realizzate non sempre si sono dimostrati efficaci nell'eliminare i fenomeni erosivi, che talora continuano ad interessare gli stessi tratti protetti, oppure si "spostano" semplicemente verso i tratti non ancora protetti.

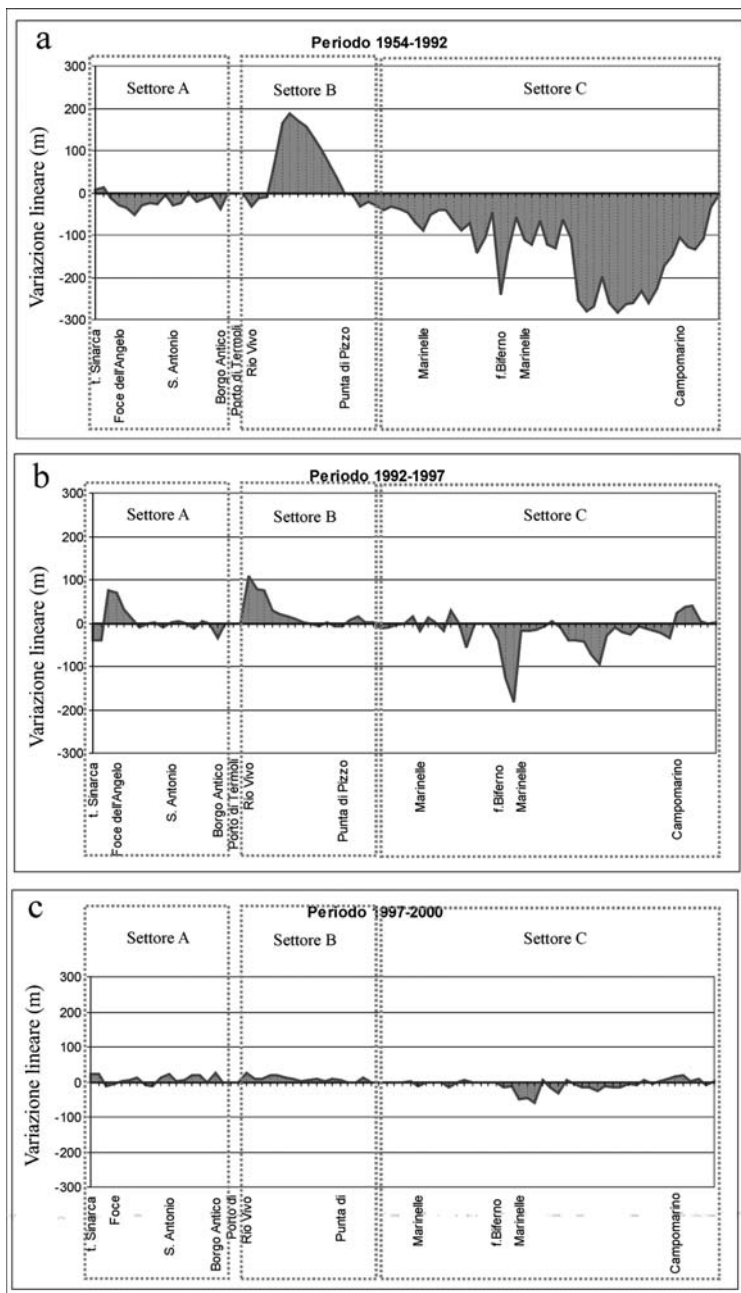


Figura 10 - Variazioni lineari medie (m) della linea di riva nei vari intervalli di tempo considerati: a) 1954-1992; b) 1992-1997; c) 1997-2000.

Discussione dei dati acquisiti

In relazione alle tendenze evolutive più recenti, i risultati ottenuti hanno consentito di definire i tre tratti costieri distinti A, B e C rispettivamente in equilibrio, in progradazione ed in erosione. Le spiagge ricadenti nel tratto A sono state interessate prima da erosione e successivamente da fenomeni locali di progradazione e di erosione che nell'insieme definiscono una condizione di sostanziale equilibrio, anche se si registra una recentissima accentuazione dei processi di erosione. Il tratto B è stato interessato, sia complessivamente che per singoli periodi, da variazioni positive della linea di costa e risulta quindi essere in progressiva progradazione. Il tratto C, infine, sia per singoli periodi che per l'intero periodo, risulta interessato da notevoli fenomeni di arretramento, che lo pongono, nonostante la sua copertura praticamente continua con scogliere longitudinali, in condizioni di elevato pericolo di erosione e degrado.

Lo studio condotto ha evidenziato che il fenomeno erosivo è risultato molto più pronunciato nel tratto C che non nel tratto A. La causa di ciò va ricercata, a nostro avviso, oltre che nelle caratteristiche sedimentologiche e morfologiche dei rispettivi fondali, soprattutto nelle locali condizioni meteomarine, legate all'orientamento della costa e quindi alla sua maggiore o minore esposizione alle ondate a maggior energia.

Le considerazioni qui di seguito esposte scaturiscono dalla applicazione di un semplice modello qualitativo (Fig. 11) per il quale sono state considerate esclusivamente le ondate al largo. Ciò è giustificato dal fatto, che i fondali antistanti il settore costiero in esame non presentano rilevanti variazioni morfologiche e conservano infatti una morfologia a bande sub-parallele decisamente regolare, per cui, in prima approssimazione, è possibile considerare trascurabili eventuali effetti di rifrazione capaci di indurre delle variazioni delle direzioni delle onde.

Il settore costiero in esame risulta caratterizzato da direzioni medie della linea di costa leggermente diverse a nord e a sud del promontorio di Termoli, pari rispettivamente a 113°N e 130°N . Le relative direzioni normali sono quindi date rispettivamente da 23° e 40°N (Fig. 11).

Come già discusso prima, le ondate principali che interessano il settore costiero in esame provengono dal I e VIII ottante ed in particolare da 23° e 350°N .

Lungo la costa a nord di Termoli le onde provenienti da 350°N formano con la normale alla linea di costa un angolo di 33° e attivano una corrente litoranea diretta da NW verso SE (Fig. 11a). Le stesse onde sul litorale a sud di Termoli formano un angolo più ampio con la normale alla linea di costa, pari a 50° , e attivano una corrente litoranea sempre diretta da NW verso SE ma con caratteristiche energetiche più elevate rispetto alla corrente sviluppata sulla spiaggia a nord di Termoli. Quando le ondate provengono da 23°N (Fig. 11b), il loro angolo di incidenza nel tratto a nord di Termoli è pari a 90° , quindi senza effetto sul *drift* litoraneo che si genera, invece, a causa dell'effetto di disturbo da parte della struttura portuale sull'incidenza delle onde, e risulta diretto verso NW. Le stesse ondate, a sud del porto di Termoli, formano un angolo di 17° con la normale alla linea di costa consentendo lo sviluppo di una modesta corrente lungo costa verso SE.

In sintesi, le ondate principali producono, come già evidenziato da studi precedenti (Parea, 1986; Aucelli et al., 2004), una prevalente corrente longitudinale orientata in direzione NW-SE. Sulla base del diverso orientamento della linea di costa, rispettivamente a nord e a sud del promontorio di Termoli, tale corrente risulta essere più pronunciata nel settore C dove favorisce l'istaurarsi di condizioni di maggiore erosione e dispersione dei sedimenti sabbiosi verso SE.

Le generali condizioni di *drift* da NW verso SE non sempre trovano un riscontro locale. Infatti, lungo il litorale molisano in generale e nel settore costiero in esame in particolare, sono state rilevate alcune situazioni per le quali è evidente una locale inversione del *drift* a seguito di fenomeni di diffrazione del moto ondoso dovuti all'effetto di disturbo provocato dalla presenza di strutture marittime di vario tipo. Al riguardo è emblematico il caso del porto di Termoli, costruito intorno al 1900 e più volte ampliato nel corso degli ultimi 25 anni circa. E', infatti, il prolungamento della diga foranea nord ad apparire responsabile dell'innescarsi di un fenomeno di diffrazione del moto ondoso che causa repentini fenomeni di interrimento dell'imboccatura del porto e la veloce e progressiva progradazione della spiaggia di Rio Vivo. Infatti, in presenza di ondate provenienti da NW (315°N) si genera un *drift* prevalente orientato da NW verso SE lungo la spiaggia di S. Antonio (tratto A) che viene ad interrompersi in prossimità della diga foranea nord del porto di Termoli dove viene a formarsi un sistema di circolazione a vortice che muovendosi in senso orario causa un accumulo di sedimenti all'imboccatura del porto e lungo la spiaggia di Rio Vivo. Lo stesso sistema di circolazione viene a formarsi anche in presenza di ondate provenienti da NE ($1-45^{\circ}\text{N}$), che provocano una locale inversione del *drift* costiero che risulta quindi diretto verso NW lungo la spiaggia di S. Antonio. La tendenza alla progradazione del tratto B negli ultimi decenni, appare quindi imputabile ai fenomeni di diffrazione appena descritti. Osservazioni effettuate in campo in occasione di eventi di mareggiata caratterizzati da ondate provenienti dal I e soprattutto dal VIII ottante, confermano che l'oggetto del molo nord determina un cono di diffrazione a tergo dell'opera causando la perdita di energia e favorendo la sedimentazione al margine del molo sud del porto e in corrispondenza della sua imboccatura.

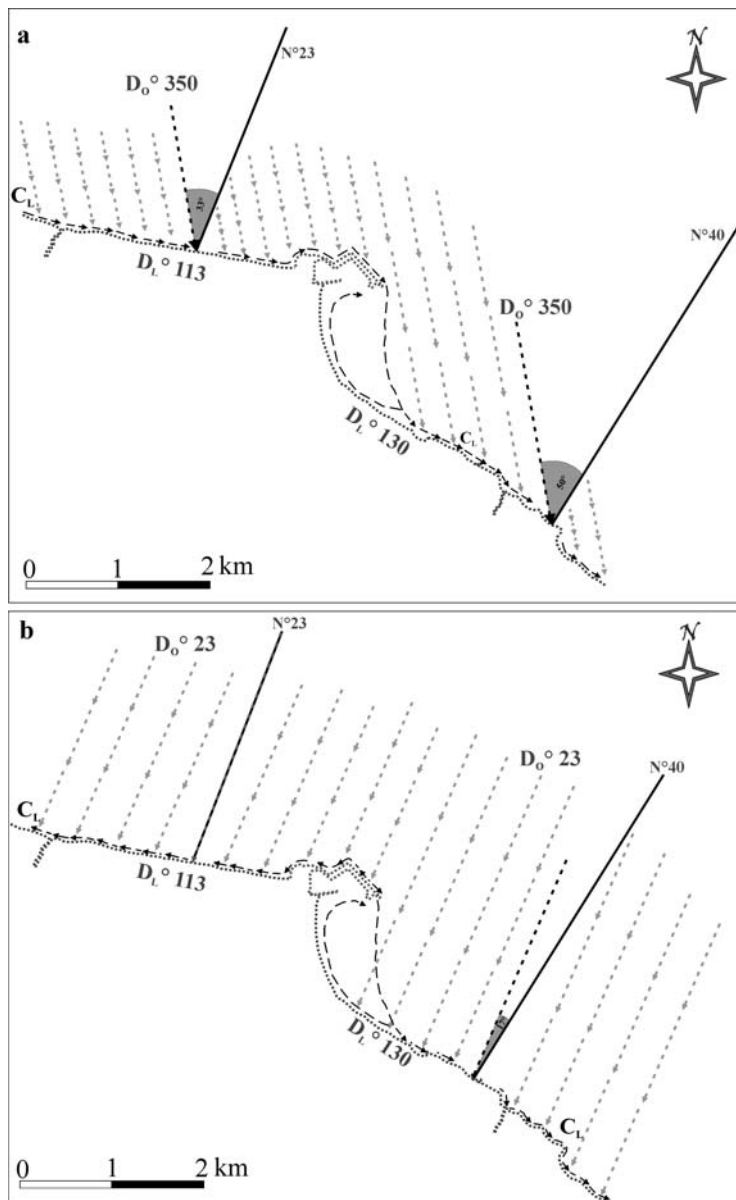


Figura 11 - Verso delle correnti longitudinali rispettivamente a nord e a sud del promontorio di Termoli in base al campo direzionale ed angolo di incidenza sulla costa delle onde prevalenti a maggior energia: a) 350°N; b) 23°N. D_L = direzione della linea di costa in gradi rispetto al Nord. C_L = verso della corrente lungo costa. D₀ = Direzione dei fronti d'onda di mare lungo.

Considerazioni conclusive

La costa molisana in generale e il settore costiero in esame in particolare sono interessati da una prevalente e persistente tendenza all'arretramento che appare controllata, oltre che dalla riduzione progressiva degli apporti solidi da parte dei corsi d'acqua principali (fiumi Biferno e Trigno, torrenti Sinarca e Saccione), anche dalle condizioni locali del clima meteomarina e dalle variazioni che questo ha subito a partire dalla metà degli anni '70. Il fenomeno erosivo è risultato particolarmente marcato nel tratto C dove, nonostante la copertura completa con opere di difesa, sono stati raggiunti i valori di arretramento più elevati riscontrati per l'intero litorale molisano e pari a ca. 500 m tra il 1954 e 2000.

Il regime anemometrico nel settore costiero in esame è dominato dai venti provenienti dai settori settentrionali. Il campo anemologico dedotto è risultato coerente e coincidente con il campo ondometrico soprattutto per le direzioni NW e NE a cui sono associati valori di *fetch* più elevati, e di conseguenza gli effetti di erosione legati alle ondatazioni principali risultano essere strettamente collegati al regime anemometrico e di conseguenza anche alle variazioni che questo ha subito. Le variazioni registrate - gli aumenti significati-

vi della frequenza dei venti provenienti dal I e VIII ottante, la comparsa e l'aumento notevole, rispettivamente, degli stessi per intensità superiori ai 48 nodi, e la recentissima riduzione delle frequenze degli eventi di calma - indicano importanti cambiamenti del regime anemometrico e quindi con ogni probabilità del clima. Tali variazioni si traducono in un aggravamento notevole per le condizioni di stabilità del settore costiero in esame, anche perché i venti interessati non sono stagionali ma sempre attivi. L'efficacia delle ondate principali collegate ai venti settentrionali differisce in relazione ai diversi angoli di incidenza sulla costa, sia per propria direzione che per orientamento diverso della costa a nord e a sud del promontorio di Termoli pari rispettivamente a 113°N e 130°N, portando a condizioni di erosione nettamente maggiori nel tratto C. Questo ultimo, infatti, se da un lato risulta relativamente protetto dalle scogliere da una dispersione dei sedimenti verso il largo, dall'altro risulta essere interessato da un maggiore *drift* litoraneo (forse in parte anche imputabile alla presenza stessa delle scogliere) e da una conseguente dispersione dei sedimenti verso SE molto più consistente. Ciò porta a dover definire, tenendo conto delle attuali condizioni meteomarine e della frequenza crescente di mareggiate, il tratto C ad alto rischio di erosione.

Bibliografia

- AA.VV. (2005) - *La Dinamica della costa molisana*. Convenzione tra l'Università degli Studi del Molise - Dipartimento S.T.A.T. e la Regione Molise. IV e V Relazione semestrale, giugno e dicembre 2005.
- AA.VV. (2006) - *La Dinamica della costa molisana*. Convenzione tra l'Università degli Studi del Molise - Dipartimento S.T.A.T. e la Regione Molise. VII Relazione semestrale, novembre 2006.
- Antonioli F. (a cura di) (2000) - *Le fluttuazioni del clima nel corso dell'Olocene: stato dell'arte*. Il Quaternario, 13 (1): 95-128.
- Assessorato ai Lavori Pubblici della Regione Molise (2001) - *Studio specialistico relativo all'erosione marina sulla intera costa della Regione Molise*. Campobasso.
- Atzeni A. (2003) - *Effetti idrodinamici sulle spiagge della costa occidentale della Sardegna*. Studi Costieri, 3: 61-80.
- Aucelli P.P.C. e Roskopf C. (2000) - *Last century valley floor modifications of the Trigno River (Southern Italy): a preliminary report*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 23: 105-115.
- Aucelli P.P.C., Iannantuono E. e Roskopf C.M. (2003) - *Evolutive trends and present morphodynamics along the Molise coast and their relationship to shore protection structures (Southern Italy)*. Atti del Convegno: 4th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems. Bologna, Giugno 2003, pp. 157-159.
- Aucelli P.P.C., Brancaccio L., Faillace P.I., Pellegrino P., Roskopf C.M. e Scapillati N. (2004) - *L'evoluzione recente della costa molisana (Italia meridionale)*. Il Quaternario, 17 (1): 21-31.
- Balzano A., Cappiotti L., Soldini L. e Zanuttigh B. (2005) - *Modellazione numerica della circolazione attorno ad opere trascinabili*. Studi costieri, 9: 119-157.
- Bartolini C., Corda L., D'Alessandro L., La Monica G.B e Regini E. (1977) - *Studi di morfologia costiera: III - Il tombolo di Feniglia*. Boll. Soc. Geol. It., 96: 117-157.
- Bascom W. (1965) - *Onde e spiagge*. Zanichelli, Bologna.
- Bondesan M. e Simeoni U. (1983) - *Dinamica e analisi morfologica statistica dei litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta*. Memorie di Scienze Geologiche, 36: 1-48.
- Carobene L. e Brambati A. (1975) - *Metodo per l'analisi morfologica quantitative delle spiagge*. Boll. Soc. Geol. It., 94: 479-493.
- Carobene L. e Brambati A. (1977) - *Analisi morfologica delle spiagge dell'alto Adriatico tra I fiumi Brenta e Tagliamento*. Boll. Soc. Geol. It., 96: 1-139.
- Cipriani L.E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F. e Pranzini E. (2001) - *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale*. Studi Costieri, 4: 119-156.
- D'Alessandro L., Davoli L., Fredi P. e Lupia Palmieri E. (1982) - *Il litorale calabro compreso tra il delta del Fiume Savuto e Capo Bonifati: evoluzione recente della spiaggia e variazione del regime anemometrico*. Prog. Fin. Conservazione del Suolo - Dinamica dei Litorali, CNR 201, pp. 1-39.
- D'Alessandro L., Davoli L., Lupia Palmieri E. e Raffi R. (2002) - *Natural and anthropogenic factors affecting the recent evolution of beaches in Calabria*. In: applied Geomorphology: Theory and Practise, edited by R.J. Allison. John Wiley & Sons, Ltd., pp. 397-427.

- Folk R.L. e Word W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journ. Sedim. Petrol., 27: 3-26.
- Girardi A., Parea G.C. e Zunica M. (1985a) - *Atlante delle spiagge italiane: Dinamismo - Tendenza evolutiva - Opere umane. Foglio 147 - Lanciano, Foglio 148 - Vasto (scala 1:100.000)*. C.N.R. - P.F. "Conservazione del Suolo", Sottoprogetto "Dinamica dei litorali", S.EL.CA., Firenze.
- Girardi A., Coltellacci M., Parea G.C. e Zunica M. (1985b) - *Atlante delle spiagge italiane: Dinamismo - Tendenza evolutiva - Opere umane. Foglio 155 - San Severo (scala 1:100.000)*. C.N.R. - P.F. "Conservazione del Suolo", Sottoprogetto "Dinamica dei litorali", S.EL.CA., Firenze.
- Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero (2006) - *Le spiagge del Molise*. In: *Lo stato dei litorali italiani*. Studi costieri, 10: 65-70.
- Iannantuono E. (2002) - *Studio della dinamica della costa molisana dal 1954 ad oggi attraverso l'analisi geomorfologica e climatica*. Tesi di Laurea, anno accademico 2001-2002, Università degli Studi del Molise, 120 pp.
- Iannantuono E., Aucelli P.P.C. e Roskopf C.M. (2005) - *La caratterizzazione ambientale della fascia costiera di Termoli*. In: *Pesca marittima e acquicoltura: aspetti economici e ambientali di Forleo M* (a cura di). Edizioni Scientifiche Italiane: 171-194.
- Komar P.D. (1998) - *Beach processes and sedimentation*. 2a Ed. Prentice Hall, N.J., 544 pp.
- Marabini F. (2000) - *Effetti sull'erosione costiera dei fenomeni climatici recenti: l'esempio del litorale nord adriatico. Mare e cambiamenti globali*. Convegno IGRAM, 25/26 Febbraio 1999, Roma, pp. 119-134.
- Metaxas D.A., Bartzokas A. e Vibras (1991) - *Temperature fluctuations in the Mediterranean area during the last 120 years*. International Journal of Climatology, 11: 897-908.
- Parea G. C. (1978) - *Trasporto dei sedimenti ed erosione costiera lungo il litorale fra il Tronto ed il Fortore (Adriatico Centrale)*. Mem. Soc. Geol. It., 19: 361-367.
- Patacca E., Sartori R. e Scandone P. (1992) - *Tyrrhenian basin and appenninic arcs: Kinematic relations since late Tortonian times*. Mem. Soc. Geol. It., 45: 425-451.
- Pirazzoli P.A. e Tomasin A. (2003) - *Recent near-surface wind changes in the central Mediterranean and Adriatic areas*. International Journal of Climatology, 23: 963-973.
- Pirazzoli, P.A., Regnaud, H. e Lemasson L. (2004) - *Changes in storminess and surges in western France during the last century*. Marine Geology, 210: 307-323
- Pranzini E. (2004) - *La forma delle coste: geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli, 245 pp.
- Vittorini S. (1991) - *La diminuzione del trasporto solido nei fiumi italiani tra il periodo prebellico e quello attuale*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 14: 252-258.
- Werner P.C., Gerstengarbe F.W., Fraedrich K. e Oesterle H. (2000) - *Recent climate change in the North Atlantic/European sector*. International Journal of Climatology, 20: 463-471.
- Zunica M. (1987) - *Lo spazio costiero italiano*. Valerio Levi Editore, 212 pp.

Ricevuto il 15/03/2006, accettato il 10/07/2007.

I fenomeni d'instabilità nell'evoluzione della costa alta delle Cinque Terre (Liguria Orientale)

Andrea Cevasco

Dipartimento per lo studio del Territorio e delle sue Risorse, Università di Genova,
Corso Europa, 26 - 16132 Genova. E-mail: cevasco@diptervis.unige.it

Riassunto

Lo studio interessa la fascia costiera delle Cinque Terre, compresa fra i borghi di Monterosso e Riomaggiore, ubicata all'estremità orientale dell'Arco ligure. Il litorale, impostato in prevalenza su rocce flischoidi appartenenti al Macigno (Falda Toscana) e, in parte, su formazioni a dominante pelitica (Complesso Subligure di Canetolo), presenta su vasta scala un andamento lineare ed è costituito da ripidi tratti a costa alta interrotti, localmente, da spiagge di ridotta estensione. L'area, per i numerosi valori paesaggistici, ambientali nonché storici e culturali, ricade interamente, dal 1999, all'interno dei confini del Parco Nazionale delle Cinque Terre. Lungo la costa l'elemento di maggiore continuità e ricorrenza è costituito dalla franosità che, oltre a imprimere caratteri assai peculiari al paesaggio, ha condizionato in maniera evidente l'utilizzo del suolo fin dall'antichità. L'origine dei fenomeni gravitativi è ricollegabile direttamente a fattori naturali, fra i quali l'elevata acclività, il peculiare assetto strutturale e tettonico, la presenza di formazioni geologicamente eterogenee e strutturalmente complesse, l'esposizione all'erosione operata dal moto ondoso; ad essi si sono sovrapposti, nell'ultimo millennio, gli effetti di una marcata antropizzazione che, dapprima attraverso il terrazzamento e, successivamente, con la costruzione di numerose opere di difesa e di consolidamento, ha modificato, in molti casi, i naturali dinamismi evolutivi dell'area.

In tale contesto, all'interno del quale va assumendo sempre maggiore rilievo l'importanza delle attività connesse al turismo, risulta indispensabile garantire il controllo dei fenomeni in atto ed attuare interventi che consentano di prevenire lo sviluppo di nuove condizioni di rischio.

Parole chiave: frane costiere, coste alte, difese a mare, evoluzione dei litorali, lineamenti tettonici, morfologia costiera, Parco Nazionale delle Cinque Terre.

Abstract

The Cinque Terre coastline between Monterosso and Riomaggiore, at the easternmost end of the Ligurian arc, has been studied to provide an updated picture of the interaction between instability phenomena, the structural situation and defence works. The littoral, which lies mainly on flysch belonging to the Macigno (Tuscan Nappe) and partly on pelitic formations (Canetolo Sub-Ligurian Complex) has a linear trend of vast scale and consists of tracts of steep cliffs interrupted, locally, by beaches of reduced dimensions. Due to its scenic, environmental, historical and cultural importance, the entire area was incorporated in the Cinque Terre National Park in 1999. The most commonly occurring characteristic of the area is its instability phenomena, which has given the area not only its particular scenic beauty but has also strongly influenced the way its soil has been utilised since antiquity. Its gravitative phenomena can be directly linked to natural causes, such as the area's high acclivity, the peculiar structural and tectonic situation, the presence of heterogeneous and structurally complex geological formations, the exposure to wave erosion. The instability of the cliffs of Cinque Terre has been influenced by marked anthropisation over the last millennium, firstly in the form of terracing and, successively, by the construction of numerous defen-

ce and consolidation works that have, in many cases, modified the natural evolutive dynamism of the area. Given the economic importance of tourism in the area it is imperative to control the phenomena actually occurring there and to take action to stop the development of further risky conditions.

Keywords: *coastal landslides, high rocky coasts, defence works, littoral evolution, tectonic lines, coastal morphology, Cinque Terre National Park.*

Premessa

Le coste alte rappresentano forme del paesaggio assai varie e mutevoli nel tempo. La loro evoluzione, che può avvenire con velocità differenti, dipende dalle complesse interazioni fra diversi elementi che possono intervenire sia a scala regionale e/o globale, quali la tettonica, l'eustatismo ed il clima, sia a scala locale, quali, ad esempio, le attività antropiche.

L'evoluzione di una costa alta, che spesso determina condizioni di instabilità, può essere considerata l'insieme delle trasformazioni che essa subisce ricercando una condizione in equilibrio con le condizioni globali e locali al contorno ma poiché dagli elementi sopra evidenziati derivano condizioni che variano nel tempo tale equilibrio risulta di tipo "dinamico".

Il tratto costiero delle Cinque Terre, caratterizzato dalla presenza di numerosi fenomeni d'instabilità, costituisce un peculiare esempio di quanto sopra esposto essendo, in pratica, interpretabile quale risultato della risalita eustatica olocenica e del relativo alto livello di stazionamento. Poiché è plausibile ipotizzare che durante il lungo periodo glaciale l'area emersa avesse raggiunto condizioni di relativo equilibrio e stabilità, l'arretramento costiero verificatosi negli ultimi 2.000 - 4.000 anni, che ha profondamente modificato la precedente morfologia, rappresenta, con buona probabilità, la principale causa dell'attuale instabilità della costa in oggetto. Un'accurata ricostruzione dell'evoluzione quaternaria del tratto costiero in oggetto non dovrebbe, inoltre, prescindere dalle valutazioni in merito al sollevamento dell'area, unitamente a quelle inerenti le oscillazioni eustatiche. Tuttavia, in questa sede, ci si concentrerà maggiormente sull'analisi dei meccanismi dell'attuale evoluzione dei fenomeni d'instabilità costieri e delle problematiche che derivano dalla loro presenza.

Introduzione

L'importanza della franosità lungo la fascia costiera delle Cinque Terre ha spinto, fin dalla metà dell'800, diversi autori ad avviare studi finalizzati all'approfondimento di tale tematica. Alcuni di essi hanno permesso di ottenere conoscenze di base in merito ad eventi franosi di particolare interesse per i loro risvolti sull'ambiente antropizzato (Guidoni, 1854 e 1902; De Stefanis et al., 1978; Federici et al., 2001), altri hanno affrontato il tema dei rapporti fra dissesti ed opere antropiche, soprattutto in riferimento al recente abbandono dei terrazzamenti costruiti sui versanti (Terranova, 1984, 1987, 1989; De Stefanis et al., 1985; Brandolini e Terranova, 1995). Con questo lavoro, tralasciando volutamente quest'ultimo aspetto, già ampiamente dibattuto in altri lavori, si intende fornire un quadro generale, aggiornato, delle differenti tipologie di fenomeni d'instabilità che interessano il tratto costiero delle Cinque Terre e dei loro rapporti con le condizioni geologico-strutturali, le principali opere di difesa a mare e l'erosione operata dal moto ondoso.

Lo studio è stato condotto attraverso l'effettuazione di rilievi geologici e geomorfologici da terra e da mare per la definizione delle tipologie di instabilità e dello stato di attività dei fenomeni, l'interpretazione di riprese aeree per l'individuazione dei principali lineamenti tettonici, la realizzazione di rilievi geo-strutturali per la definizione dello stato di fratturazione degli ammassi rocciosi. A tale riguardo lungo la fascia costiera sono state effettuate 15 stazioni di rilievo strutturale che hanno permesso di acquisire dati relativi a 519 discontinuità, successivamente elaborate per mezzo di *rose diagrams*. I dati acquisiti sono stati utilizzati per l'elaborazione di una cartografia originale dei fenomeni d'instabilità dell'area a scala 1:10.000 modificando lo schema metodologico adottato in Cevasco et al. (2000). La cartografia, che viene qui riportata a scala ridotta, fornisce, oltre al quadro della franosità, delle tipologie (i fenomeni d'instabilità attivi sono stati inseriti nello schema classificativo di Varnes, 1978) e dello stato di attività dei fenomeni, informazioni di carattere geologico-strutturale e tettonico, l'orientazione delle principali discontinuità rilevate alla mesoscala, l'ubicazione (e lo stato di conservazione) delle opere di difesa aderenti alla costa ed indicazioni sulla natura del litorale.

Aspetti geomorfologici

L'area di studio è ubicata all'estremità orientale della costa ligure (Fig. 1). La linea di costa compresa fra i borghi di Monterosso e Riomaggiore si estende per circa 11 km ed è caratterizzata per la maggior parte del suo sviluppo (quasi 8 km) da costa alta alquanto ripida, in alcuni casi verticale.

Le rare spiagge, costituite da depositi ciottolosi e ghiaiosi, si estendono per brevi tratti e vengono alimentate, periodicamente, da materiali di frana o dal trasporto solido di brevi corsi d'acqua.

La costa è esposta frontalmente alle mareggiate provenienti dai settori di Libeccio (dominante e regnante) ed ai mari di Scirocco e mezzogiorno, di minore intensità.

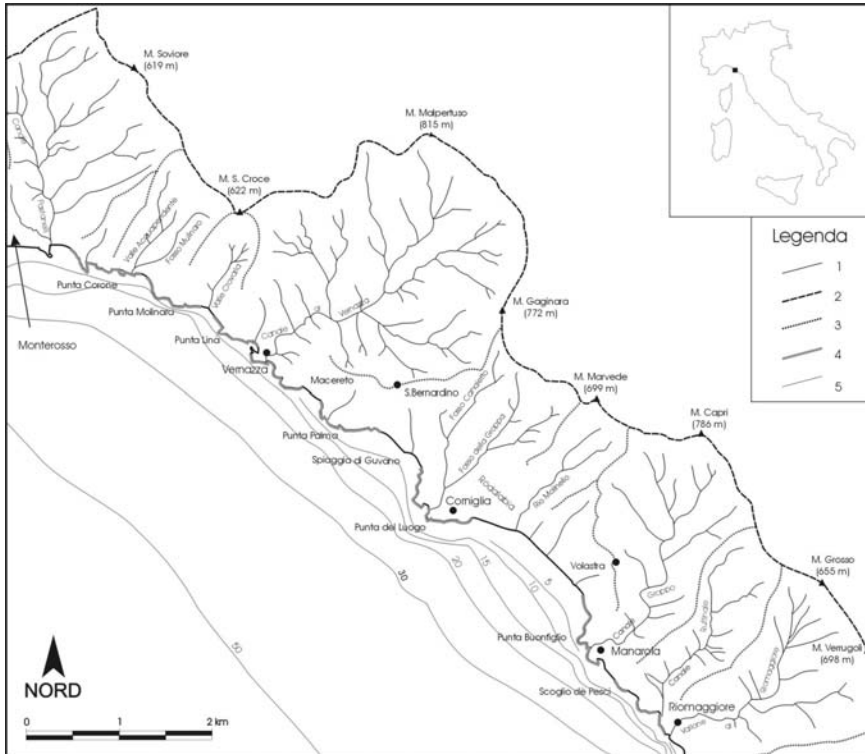


Figura 1 - Ubicazione dell'area di studio e topografia semplificata del settore costiero delle Cinque Terre. Legenda: 1: corsi d'acqua; 2: spartiacque principale; 3: spartiacque secondari; 4: litorale roccioso; 5: isobate.

I principali elementi morfologici (linea di costa, spartiacque principali e secondari, corsi d'acqua) risultano influenzati, per gran parte, dall'assetto tettonico ed in particolare dalla presenza di lineamenti in direzione NO - SE, NE - SO e, in subordine, N - S ed E - O (Figg. 1 e 2).

La morfologia costiera è caratterizzata, su ampia scala, da una linearità piuttosto evidente legata alla presenza di direttrici "appenniniche" che, a partire dal Pliocene e manifestando attività anche durante il Quaternario, hanno determinato lo sprofondamento del margine continentale (Fanucci e Nosengo, 1977; Federici e Raggi, 1979; Federici, 1980; AA.VV., 1983; Corradi et al., 1984; Raggi, 1985; Servizio Geologico d'Italia, 2003; Fig. 2).

Lo spartiacque principale che delimita l'area delle Cinque Terre dalla Valle del T. Vara, costituito da un allineamento di rilievi che superano, in diversi casi, la quota di 600 m e culminano con la cima di M. Malpertuso (815 m), è disposto parallelamente alla linea di costa e si mantiene, in genere, a breve distanza da essa. Verso mare si dipartono diversi crinali secondari che, con andamento tendenzialmente ortogonale alla linea di costa, delimitano bacini di varia estensione (fino a 7 kmq nel caso del Canale di Vernazza). Essi presentano profili fortemente irregolari che testimoniano un'evoluzione tormentata, legata, soprattutto, agli effetti della tettonica post-pleistocenica e delle variazioni glacio-eustatiche quaternarie.

Le pendenze medie dei versanti a mare risultano, quasi ovunque, superiori al 40%; le aree pianeggianti, di estensione modesta, costituiscono rare eccezioni e si osservano esclusivamente in corrispondenza di relitti di terrazzi marini, presenti a quote differenti lungo i crinali secondari, o del piede di accumuli di frane antiche.

I corsi d'acqua sono generalmente brevi e frequentemente impostati lungo le direttrici tettoniche orientate NE

- SO. Essi presentano notevoli capacità di trasporto e di erosione a causa del regime torrentizio e delle elevate pendenze che li contraddistinguono.

La larga diffusione dei fenomeni di instabilità e la presenza di vallette pensili rispetto all'attuale livello marino mettono in evidenza il carattere evolutivo assai recente della costa delle Cinque Terre.

Un'altra caratteristica assai evidente di questo territorio è rappresentata dalla sovrapposizione dell'ambiente antropizzato sull'ambiente "fisico" che si manifesta, prevalentemente, con la presenza dei noti terrazzamenti dei versanti, spesso realizzati su frane antiche e da tempo in stato di parziale abbandono.

Aspetti geologici

La costa delle Cinque Terre è caratterizzata dall'affioramento di litotipi riconducibili alla Falda Toscana cui si trovano sovrapposti terreni ascritti, in letteratura, alle Unità tettoniche di Marra e di Canetolo (Abbate, 1969; Servizio Geologico d'Italia, 2003; Fig. 2). Sotto il profilo strutturale quest'area, che rappresenta un settore molto interno dell'Appennino ligure, è parzialmente coinvolta in un'ampia antiforme coricata a vergenza tirrenica, denominata "Piega della Spezia" (Giammarino e Giglia, 1990). La piega si estende per circa 25 km dalle isole Palmaria, Tino e Tinetto, ultime propaggini verso mare del promontorio occidentale del Golfo della Spezia, fino ai dintorni di Carrodano, nell'entroterra di Levanto (non visibili nelle Figg. 1 e 2). La direzione dell'asse dell'anticlinale risulta, mediamente, N150° e l'intera struttura mostra una debole immersione assiale verso NO; la superficie assiale è suborizzontale.

La Piega della Spezia è delimitata, verso SO, da sistemi paralleli di faglie dirette orientate circa NO - SE (123°÷137°), individuate per mezzo di profili sismici a mare, responsabili dello sprofondamento del margine continentale (Corradi et al., 1984; Raggi, 1985; Servizio Geologico d'Italia, 2003). Esse formano, a mare, strutture ad horst e graben in cui le depressioni risultano completamente colmate da sedimenti plio-quadernari derivanti da fasi alterne in cui, a momenti di aggradazione e/o progradazione sono seguiti periodi di erosione in corrispondenza di regressioni glacioeustatiche.

Nei terreni della Falda Toscana sono stati riconosciuti due ben distinti eventi deformativi (Giammarino e Giglia, 1990): un primo evento, assimilabile ad uno sforzo di taglio dovuto ad una coppia destra diretta dall'interno verso l'esterno della catena appenninica, che ha prodotto un clivaggio particolarmente penetrativo ben visibile nei lito-

tipi pelitici della sequenza, ed un secondo evento, ritenuto responsabile del piegamento, retrovergente, della serie toscana nell'areale spezzino, cui è associato un clivaggio meno pervasivo che, negli intervalli meno competenti, si manifesta come clivaggio di crenulazione e presenta andamento convergente verso il nucleo della piega.

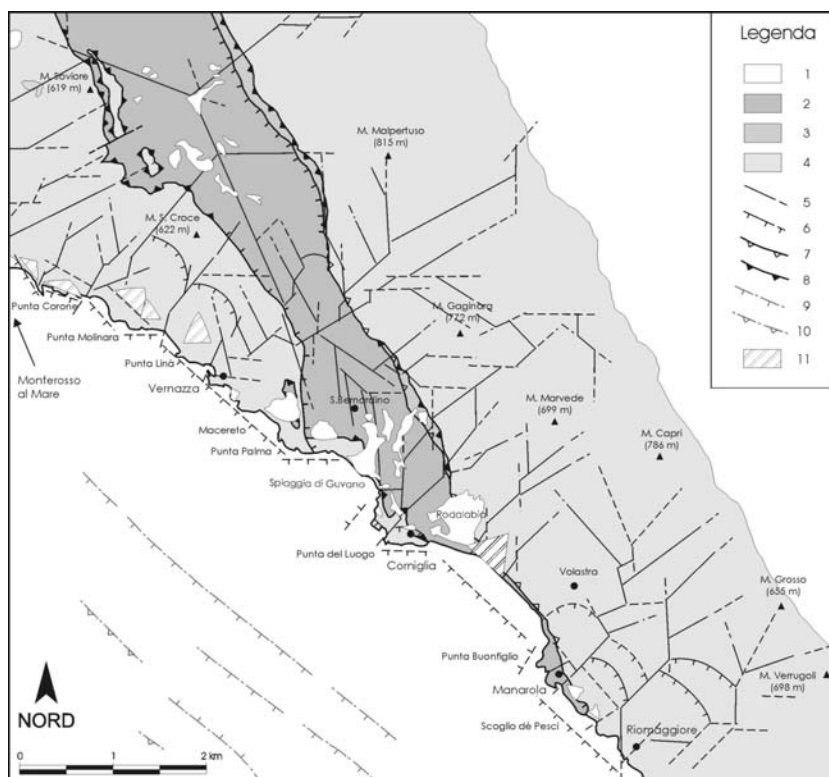


Figura 2 - Schema geologico e tettonico del settore costiero delle Cinque Terre (da Servizio Geologico d'Italia, 2003, semplificato e modificato). Legenda: 1: depositi quaternari; 2: Unità tettonica di Canetolo; 3: Unità tettonica di Marra; 4: Falda Toscana (Macigno); 5: linee tettoniche; 6: faglie dirette; 7: faglie inverse; 8: sovrascorrimenti; 9: faglie dirette sepolte che interessano la copertura pleistocenica; 10: faglie inverse sepolte che interessano la copertura pleistocenica; 11: faccette triangolari.

Procedendo lungo la costa da Riomaggiore verso Monterosso (Fig. 2) si rinviene, dapprima, la formazione sommitale della Falda Toscana, rappresentata dal Macigno (Oligocene sup.) costituito da una potente successione torbiditica di strati di vario spessore di arenarie quarzose feldspatiche da fini a grossolane alternate a sottili livelli di siltiti argillose. Ben rappresentata, all'interno della formazione è la caratteristica litofacies delle Arenarie Zonate, costituita da arenarie torbiditiche fini e siltiti grigio-scure in strati di spessore fino a 20 cm. La struttura, nel tratto costiero a NO di Riomaggiore, è caratterizzata dalla presenza di un'ampia piega ("parassita" della Piega della Spezia) con asse orientato, mediamente, N145° e piano assiale suborizzontale. A SE di Manarola compaiono le Argille e Calcari di Canetolo (Paleogene) costituite, dapprima, da olistoliti argillitici con frammenti calcarei e, successivamente, da marne siltose e siltiti grigie cui seguono, per un breve tratto a Ovest del borgo e in corrispondenza di Punta Buonfiglio, arenarie fini con intercalazioni di siltiti argillose ripiegate secondo assi N158°, attribuite alle Arenarie di Ponte Bratica (Servizio Geologico d'Italia, 2003). Procedendo verso Corniglia si rinvengono ancora le Argille e Calcari di Canetolo rappresentate, a NO di Punta Buonfiglio, da litotipi siltosi e, alla base del versante retrostante lo "Spiaggione di Corniglia", da argilliti grigio-scure con lenti calcaree. Queste ultime si estendono lungo una fascia orientata in direzione NNO - SSE compresa fra i terreni del Macigno e, verso NO, si rinvengono in posizione gradualmente più arretrata rispetto alla linea di costa. Da Punta del Luogo fino a Monterosso riprendono arenarie fini e siltiti ripiegate secondo assi orientati mediamente N160° attribuite alle Arenarie Zonate (Servizio Geologico d'Italia, 2003).

Fenomeni d'instabilità costieri

Tratto Monterosso - Vernazza

Su vasta scala l'orientazione della linea di costa, pari mediamente a N120°, risulta influenzata dai sistemi di faglie plio-pleistoceniche riscontrati a mare, la cui direzione varia, nell'area antistante la zona in esame, fra N123° e N135° (Servizio Geologico d'Italia, 2003).

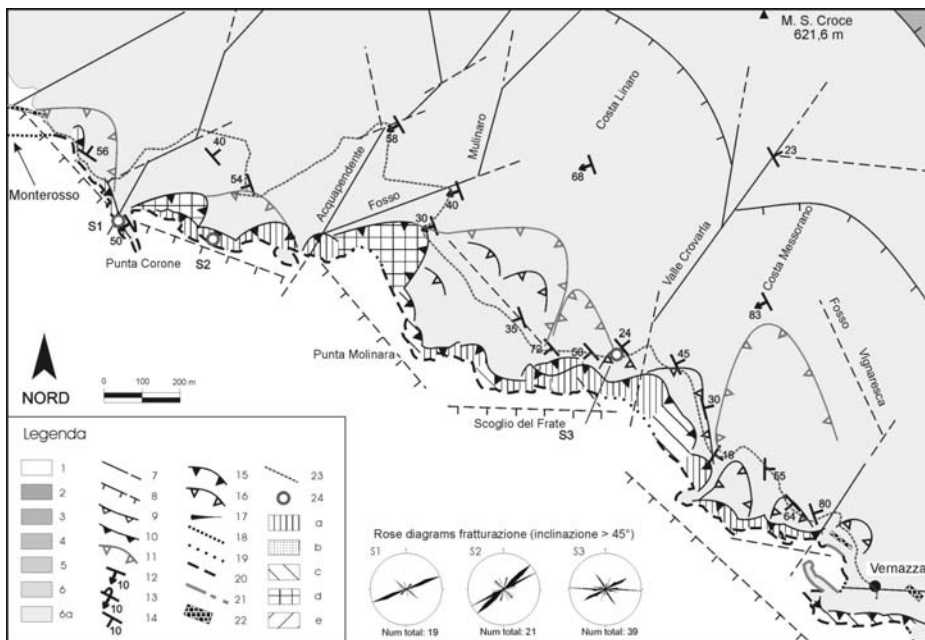


Figura 3 - Carta dei fenomeni d'instabilità costieri delle Cinque Terre fra Monterosso e Vernazza .
 Legenda: 1: depositi quaternari; 2: Arenarie di Ponte Bratica; 3: Calcari di Gruppo del Vesco; 4: Argille e Calcari di Canetolo; 5: Marne del Torrente Pignone; 6: Macigno; 6a: litofacies delle Arenarie Zonate; 7: lineamenti tettonici; 8: faglie dirette; 9: faglie inverse; 10: sovrascorrimenti; 11: limiti di faccette triangolari; 12: strati diritti; 13: strati rovesciati; 14: strati a polarità incerta; 15: cigli attivi; 16 cigli quiescenti; 17: direzione dei movimenti; 18: litorale sabbioso; 19: litorale ciottoloso o a blocchi; 20: litorale roccioso; 21: difese aderenti in buono/pessimo stato; 22: rilevato ferroviario; 23: sentiero di collegamento dei borghi delle 5 Terre; 24: stazione di rilievo strutturale. Classificazione frane (da Varnes, 1978) - In roccia: a: crollo; b: ribaltamento; c: scivolamento traslazionale; d: complessa. In detrito: e: colata. (La legenda è comune a tutte le carte dei fenomeni d'instabilità costieri).

Il tratto in questione (Fig. 3), impostato nelle Arenarie Zonate, è contraddistinto da ripide falesie attive che, in alcuni casi, superano l'altezza di 150 m. Esso presenta un'articolazione uniforme, quasi geometrica, determinata dal susseguirsi di tratti rettilinei a differente orientazione che, spesso, coincidono con la base di ampie "faccette triangolari", resti di antiche scarpate di faglia, che troncano verso mare i crinali secondari che, dallo spartiacque principale, degradano verso SO.

Lungo la costa se ne possono distinguere almeno tre tipologie con orientazione differente, rispettivamente pari a $N136^\circ$ (tratto Monterosso - Punta Corone e tratto Valle dell'Acquapendente - Valle Crovarla), $N110^\circ$ (tratto Punta Corone - Valle dell'Acquapendente) e $N95^\circ$ (tratto Scoglio del Frate - Valle Crovarla). I punti di raccordo coincidono, spesso, con lo sbocco a mare di ripide ed incassate vallecole impostate lungo lineamenti tettonici ortogonali alla linea di costa. I fenomeni di instabilità attualmente in attività costituiscono, in molti casi, l'espressione dell'erosione di tali superfici da parte del moto ondoso. Un esempio di tale condizione è mostrato in Figura 4 e si riferisce al tratto di costa compreso fra Punta Corone e la Valle dell'Acquapendente: la "faccetta triangolare", oggi parzialmente rivegetata, è interessata alle estremità orientale ed occidentale da riattivazioni i cui cigli di distacco raggiungono la quota di 100 m.



Figura 4 - Tratto costiero compreso fra Punta Corone e Valle dell'Acquapendente.



Figura 5 - Fenomeni di crollo nel tratto compreso fra Scoglio del Frate e Valle Crovarla. Alla base della falesia sono visibili alcune grotte di interstrato.



Figura 6 - Scivolamenti traslazionali fra Valle Crovarla e Punta Linà in corrispondenza della zona di cerniera di una piega con asse circa parallelo alla linea di costa (direzione NNO - SSE).

L'assetto strutturale, caratterizzato da pieghe con assi NNO - SSE, la giacitura delle superfici di stratificazione, che immergono in prevalenza verso NE e SO, la fratturazione alla mesoscala dell'ammasso roccioso (Fig. 3, stazioni S1, S2, S3), riassumibile nella presenza di giunti ad elevata inclinazione in direzione NE - SO ($N47^\circ$), ENE - OSO ($N62^\circ$), E - O ($N92^\circ$), e NNO - SSE ($N147^\circ$) ed i loro rapporti con l'orientazione dei pendii a mare determinano la tipologia dei fenomeni d'instabilità. Essi sono rappresentati, in prevalenza, da crolli nei tratti orientati E - O (Fig. 5) e da scivolamenti traslazionali, lungo i giunti di stratificazione, di blocchi svincolati dai sistemi di fratture nei tratti ad andamento NO - SE (Fig. 6).

Non mancano nicchie di svuotamento da ricondursi a fenomeni complessi in stato di attività. Gli effetti dell'azione erosiva del moto ondoso si risentono con maggiore efficacia allo sbocco a mare dei torrenti, impostati lungo linee di minor resistenza e, in rapporto all'assetto strutturale, soprattutto nei tratti orientati E - O. Qui, infatti, le agitazioni ondose, agendo parallelamente alla direzione degli strati, tendono a scalzare i livelli più fini delle Arenarie Zonate dando origine, talvolta, a grotte di interstrato che possono evolvere per successivi crolli (zona a Ovest della Valle dell'Acquapendente e ad Est dello Scoglio del Frate).

Tratto Vernazza - Corniglia

La linea di costa (Fig. 7) si sviluppa, mediamente, in direzione $N130^\circ$ ma si presenta alquanto frastagliata in una serie di piccoli promontori ed insenature, talvolta ampie, ubicate in corrispondenza delle principali nicchie di svuotamento (frana di Macereto) o di solchi vallivi di probabile origine tettonica (Vallone di Guvano).

Il tratto costiero, impostato nelle Arenarie Zonate in contatto tettonico con le Argille e Calcari di Canetolo è costituito, ad eccezione della Spiaggia di Guvano, da costa alta. L'area ha subito, in periodi differenti, varie modificazioni antropiche dapprima attraverso il terrazzamento dei versanti retrostanti le falesie e, dalla seconda metà dell'800, con la costruzione della linea ferroviaria Genova - Roma, e relative opere di difesa, che ha attraversato il piede dei principali accumuli di frana.

L'andamento della linea di costa risulta influenzato dalla presenza di linee tettoniche in direzione NO - SE, E - O e NNE - SSO (Servizio Geologico d'Italia, 2003). In questo tratto è, tuttavia, evidente anche il modellamento ad opera dei fenomeni gravitativi, testimoniati dalla presenza di estesi accumuli detritici e di ampie nicchie di svuotamento, i cui cigli di distacco risultano, allo stato attuale, prevalentemente quiescenti. I principali fenomeni franosi, procedendo da NO verso SE, sono rappresentati dalla frana di Vernazza (Terranova, 1984 e 1987), dalla paleofrana di Macereto (Terranova, 1984 e 1987) e dalla frana di Guvano, nota in bibliografia da oltre un secolo (Guidoni, 1854 e 1902; Zolfanelli e Santini, 1874; Direzione Tecnica Governativa, 1880; De Stefanis et al., 1978; Terranova, 1984 e 1987; De Stefanis et al., 1985; Federici et al., 2001).

La frana di Vernazza, ubicata a Est dell'abitato omonimo consiste in scivolamenti planari lungo i giunti di stratificazione, inclinati verso mare di 25°, di blocchi svincolati da sistemi di fratture in direzione N - S (N3°), ENE - OSO (N62°), E - O (N92°) e NO - SE (N137°) (Fig. 7, stazione S4) ad elevata persistenza, innescatosi nella litofacies delle Arenarie Zonate. L'accumulo, che giunge alla base del versante, è costituito da un conoide di blocchi rocciosi che, attualmente, ne protegge il piede dall'erosione marina (Fig. 8). Poiché la zona sottostante il ciglio di distacco è attraversata dal sentiero escursionistico di collegamento fra i borghi delle Cinque Terre, assai frequentato, al fine di garantirne la fruibilità in condizioni di sicurezza si è resa necessaria, da diversi anni, la realizzazione di interventi di difesa attivi e passivi (chiodature e reti di protezione).

La paleofrana di Macereto, ubicata a Est della precedente ed anch'essa attraversata dal sentiero escursionistico delle Cinque Terre, è stata definita da Terranova (1984) "una delle più belle nicchie di svuotamento di tutto il territorio" (delle Cinque Terre). Le dimensioni della nicchia sono ragguardevoli (500 m in larghezza, 300 m in altezza) ed al suo interno è ancora presente parte dell'accumulo, anticamente terrazzato (Fig. 9a) ed attualmente in stato di quasi completo abbandono (Fig. 9b).

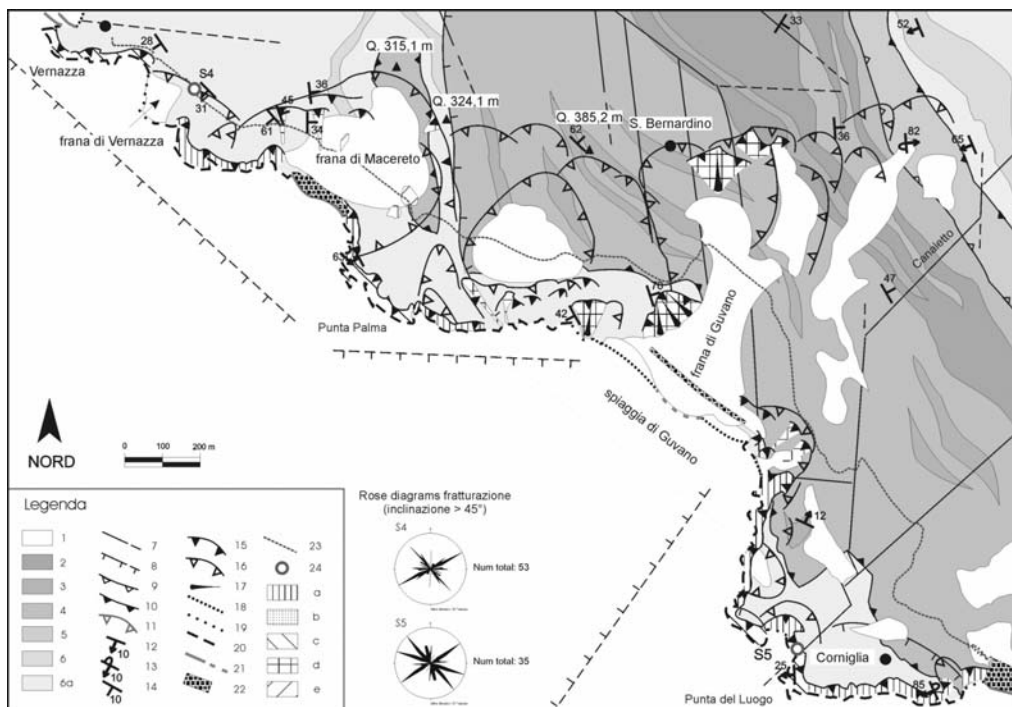


Figura 7 - Carta dei fenomeni d'instabilità costieri delle Cinque Terre fra Vernazza e Corniglia.

Legenda: 1: depositi quaternari; 2: Arenarie di Ponte Bratica; 3: Calcari di Groppo del Vesovo; 4: Argille e Calcari di Canetolo; 5: Marne del Torrente Pignone; 6: Macigno; 6a: litofacies delle Arenarie Zonate; 7: lineamenti tettonici; 8: faglie dirette; 9: faglie inverse; 10: sovrascorrimenti; 11: limiti di faccette triangolari; 12: strati diritti; 13: strati rovesciati; 14: strati a polarità incerta; 15: cigli attivi; 16: cigli quiescenti; 17: direzione dei movimenti; 18: litorale sabbioso; 19: litorale ciottoloso o a blocchi; 20: litorale roccioso; 21: difese aderenti in buono / pessimo stato; 22: rilevato ferroviario; 23: sentiero di collegamento dei borghi delle 5 Terre; 24: stazione di rilievo strutturale. Classificazione frane (da Varnes, 1978) - In roccia: a: crollo; b: ribaltamento; c: scivolamento traslazionale; d: complessa. In detrito: e: colata. (La legenda è comune a tutte le carte dei fenomeni d'instabilità costieri).



Figura 8 - Frana di Vernazza: scivolamento di blocchi svincolati da fratture ad elevata persistenza lungo i giunti di stratificazione.

Dalla seconda metà dell'800 il piede dell'accumulo, sede della linea ferroviaria Genova - Roma, è contenuto e protetto dall'erosione marina. Alcune indicazioni sull'evoluzione recente (fra il 1970 e il 2000) del versante possono essere dedotte dal confronto fra i fotogrammi riportati nelle Figure 9a e 9b. Se da un lato l'immagine del 2000 evidenzia, rispetto a quella del 1970, un miglioramento della stabilità della coltre in conseguenza dell'aumento della superficie vegetata, dall'altro desta qualche preoccupazione, soprattutto ai fini della salvaguardia del percorso escursionistico, l'evoluzione nel medio e lungo periodo di alcune frane complesse e colate detritiche che interessano, rispettivamente, l'estremità occidentale della nicchia e la zona centrale dell'accumulo.



Figure 9a e 9b - Paleofrana di Macereto: confronto fra le condizioni del versante nel 1970 (foto Nosengo S.) e nel 2000.

La frana di Guvano, ubicata all'interno dell'omonima valle, è il risultato di più eventi complessi (scivolamenti traslazionali evoluti in colate) occorsi in diverse fasi testimoniate da diversi cigli di distacco compresi fra le quote di 350 m (sottostante l'abitato di S. Bernardino) e 450 m (sottostante la località Fornacchi), oggi solo in parte attivi. Ad una prima fase, per la quale mancano riferimenti temporali certi, che coinvolse le Argille e Calcari di Canetolo e, nella zona sommitale, le Arenarie di Ponte Bratica, interessando il settore sinistro del Vallone di Guvano, è seguito un evento più recente, datato al 1853 (Guidoni, 1854 e 1902; Zolfanelli e Santini, 1874), che ha coinvolto esclusivamente le Argille e Calcari di Canetolo nella zona sottostante l'abitato di S. Bernardino, nel settore destro della valle. Riprese del fenomeno nel 1988 hanno provocato notevoli disagi alla viabilità provinciale ed al percorso escursionistico delle Cinque Terre (Federici et al., 2001), che attraversano a quota differenti l'ampio canalone. L'accumulo, di caratteristica forma ad imbuto, si estende fino al mare comprendendo, nella sua parte inferiore, materiali detritici a granulometria varia (Figg. 10a e 10b).



Figure 10a e 10b - Frana di Guvano: confronto fra le condizioni dell'area coinvolta dal movimento nel 1970 (foto Nosengo S.) e nel 2000.



L'area interessata dalla frana è stata, ed è tuttora in alcuni settori, oggetto di numerosi interventi di difesa e di consolidamento. Essi riguardano sia il versante, che nella parte alta è attraversato dalla viabilità provinciale, sia l'accumulo nelle porzioni medie ed inferiori sedi, rispettivamente, del percorso escursionistico di collegamento dei borghi delle Cinque Terre e della ferrovia litorale ottocentesca, oggi abbandonata in questo tratto. Oltre alla realizzazione di interventi volti a garantire condizioni di sicurezza per il transito lungo la viabilità provinciale ed il percorso escursionistico fra Vernazza e Corniglia, pare opportuno un controllo dell'ampio ciglio quiescente che lambisce l'abitato di S. Bernardino e, nella parte mediana ed inferiore dell'accumulo, una valutazione dell'efficacia delle opere di sostegno nonché di difesa a mare, completamente trascurate in seguito all'abbandono della linea ferroviaria, ai fini di un eventuale ripristino.

Lungo la costa rocciosa si riscontrano, nelle Arenarie Zonate, tipologie di instabilità variabili in funzione dei rapporti fra giunti di strato e versanti. Mantenendosi, in pratica, l'assetto strutturale a pieghe con assi NNO - SSE, e risultando in questo tratto, i principali sets di fratture rilevati alla mesoscala, orientati N - S (N3°-N4°), ENE - OSO (N56° - N62°), E - O (N86° - N92°) e NO - SE (N137° - N139°) (Fig. 7, stazioni S4 e S5), le tipologie prevalenti sono ancora rappresentate da crolli nei tratti ad orientazione E - O e da scivolamenti traslazionali o crolli nei tratti ad andamento NO - SE in funzione della giacitura, rispettivamente a franapoggio o a reggipoggio, degli strati. Anche in questo caso, per le motivazioni già espresse, l'azione attuale del moto ondoso risulta maggiormente efficace nei tratti orientati E - O.

Tratto Corniglia - Manarola

La costa compresa fra i promontori di Punta del Luogo e Punta Buonfiglio (non visibile interamente in Fig. 11), orientata mediamente N130°, è caratterizzata da un'ampia insenatura entro la quale si trova, alla base di un versante con acclività media pari al 90%, lo "Spiaggione di Corniglia". Nonostante tale insenatura sia impostata interamente su formazioni tendenzialmente erodibili, quali le Argille e Calcari di Canetolo, la sua genesi sembra dover si ricondurre a cause di natura tettonica, ed in particolare alla presenza di sistemi di faglie dirette che, a mare, ripetonono le geometrie della linea di costa (Servizio Geologico d'Italia, 2003).

I fenomeni d'instabilità, in questo tratto, si manifestano con rimarchevole continuità e presentano strette relazioni con l'assetto geologico strutturale e tettonico, le proprietà meccaniche degli ammassi rocciosi, le loro condizioni di fratturazione, l'erosione attualmente operata dal moto ondoso nonché, per quanto riguarda i dinamismi recenti, le attività antropiche. E' possibile distinguere gli ampi cigli quiescenti e gli accumuli, prevalentemente stabilizzati, testimoni di fenomeni antichi ben noti in letteratura (De Stefanis et al., 1978; Terranova, 1984 e 1987), dalle instabilità recenti che interessano sia la costa rocciosa, direttamente esposta alle mareggiate (falesie del promontorio di Punta del Luogo e a Nord di Punta Buonfiglio), sia il versante retrostante lo "Spiaggione di Corniglia" (Terranova, 1984 e 1987, Brandolini e Terranova, 1995).

Procedendo da NO verso SE il Promontorio di Punta del Luogo presenta falesie intagliate nelle Arenarie Zonate, ripiegate secondo assi NNO - SSE, interessate da evoluzioni per crollo sui versanti occidentali e meridionali. Nella zona frontale del promontorio, esposta a SO, la giacitura e lo stato di fratturazione delle arenarie, interessate da sets orientati N - S (N4°), ENE - OSO (N56°), E - O (N86°), ESE - ONO (N108°) e NO - SE (N139°) (Fig. 11, stazione S5), rendono possibili scivolamenti traslazionali lungo i giunti di stratificazione. Il versante meridionale del promontorio, alla sommità del quale si trova l'abitato di Corniglia, è costituito da una falesia attiva di altezza pari a circa 100 m, di probabile origine tettonica, parzialmente protetta, alla base, da una scogliera. In questo caso la vicinanza di alcune abitazioni ai cigli di distacco attivi impone l'attuazione di interventi che consentano di impedirne un ulteriore arretramento.

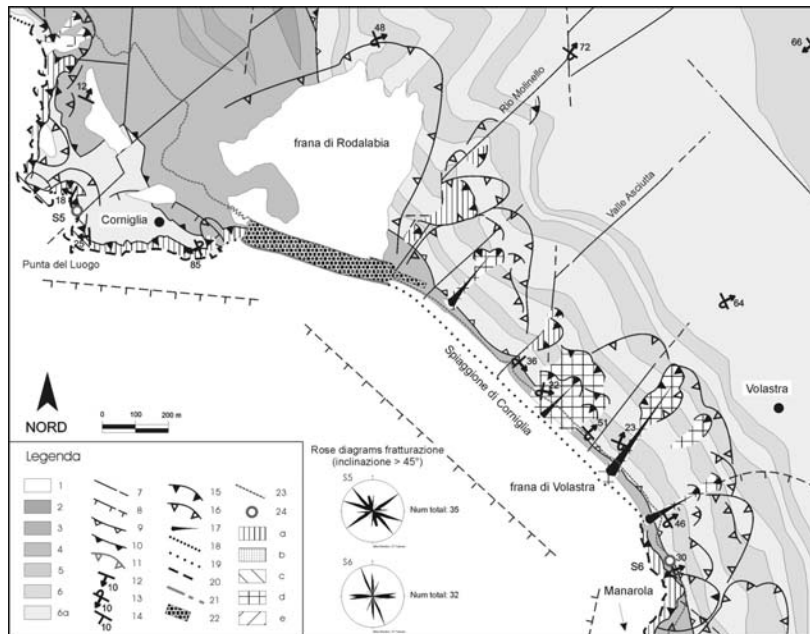


Figura 11 - Carta dei fenomeni d'instabilità costieri delle Cinque Terre fra Corniglia e Manarola. Legenda: 1: depositi quaternari; 2: Arenarie di Ponte Bratica; 3: Calcari di Groppo del Vescovo; 4: Argille e Calcari di Canetolo; 5: Marne del Torrente Pignone; 6: Macigno; 6a: litofacies delle Arenarie Zonate; 7: lineamenti tettonici; 8: faglie dirette; 9: faglie inverse; 10: sovrascorrimenti; 11: limiti di faccette triangolari; 12: strati diritti; 13: strati rovesciati; 14: strati a polarità incerta; 15: cigli attivi; 16: cigli quiescenti; 17: direzione dei movimenti; 18: litorale sabbioso; 19: litorale ciottoloso o a blocchi; 20: litorale roccioso; 21: difese aderenti in buono / pessimo stato; 22: rilevato ferroviario; 23: sentiero di collegamento dei borghi delle 5 Terre; 24: stazione di rilievo strutturale. Classificazione frane (da Varnes, 1978) - In roccia: a: crollo; b: ribaltamento; c: scivolamento traslazionale; d: complessa. In detrito: e: colata. (La legenda è comune a tutte le carte dei fenomeni d'instabilità costieri).

Lungo il restante tratto costiero la presenza delle Argille e Calcari di Canetolo crea frequenti motivi di squilibrio ed in passato ha rivestito un ruolo di sicura importanza, quale fattore predisponente, nella genesi della paleofrana di Rodalabìa (De Stefanis et al., 1978 e 1985; Terranova, 1984 e 1987), ubicata sul lato occidentale dell'insenatura (Fig. 11). La frana, il cui ciglio presenta una forma largamente parabolica e si estende oltre la quota di 400 m, è impostata quasi interamente nelle Argille e Calcari di Canetolo e coinvolge, nella parte superiore, il Macigno e le Arenarie Zonate. Si tratta di un fenomeno complesso, la cui genesi, secondo De Stefanis et al. (1978), sarebbe da far risalire a periodi in cui il livello marino, relativamente più elevato rispetto alla posizione attuale, rendeva possibile un'azione di scalzamento, favorita dal contatto fra le arenarie e le argilliti, del substrato roccioso, sconnesso in blocchi da sistemi di faglie in direzione NNO - SSE e circa E - O.

Il vasto accumulo, lo spessore del quale, nella parte terminale, è stato valutato nell'ordine di diverse decine di metri (Terranova, 1984), è stato in gran parte asportato dall'azione erosiva del moto ondoso ed in parte terrazzato fin dall'antichità.

Il piede si trova, dalla seconda metà dell'800, contenuto da muraglioni di protezione della ferrovia mentre sul lato a mare sono state realizzate scogliere ed eretti altri muri di difesa dalle mareggiate. Se da una lato tali, poderose, opere hanno permesso di migliorare le condizioni di stabilità dell'ampio corpo di frana, non vi è dubbio che lo "Spiaggione di Corniglia", che in passato traeva alimentazione soprattutto da quest'ultimo, ne abbia subito conseguenze negative (Fig. 12).

In particolare, per il suo mantenimento, non sembrano sufficienti gli apporti delle numerose frane in atto lungo il versante retrostante, compreso fra il Rio Molinello e la radice del promontorio di Punta Buonfiglio. Si tratta, nella maggior parte dei casi, di movimenti in rapida evoluzione, con dinamismi complessi, favoriti dall'abbandono dei terrazzamenti dei quali sono ancora visibili, benché la vegetazione vada ricoprendo rapidamente il versante, numerose tracce. Le frane attuali, in questo caso, possono essere considerate manifestazioni della ripresa, violenta, dell'erosione sulle superfici precedentemente terrazzate.

La Figura 13 evidenzia l'evoluzione di colate detritiche superficiali, impostate lungo linee preferenziali di scorrimento delle acque, che hanno ormai raggiunto, andando ad interessare il bedrock fratturato, dimensioni tali da renderle difficilmente arrestabili.



Figura 12 - "Spiaggione di Corniglia".

Figura 13 - Vista frontale del versante retrostante lo "Spiaggione" di Corniglia e dei fenomeni d'instabilità che lo interessano.



Fra i fenomeni che interessano il versante retrostante lo “Spiaggione di Corniglia” l'esempio più evidente è rappresentato dalla frana di Volastra, il cui ciglio sommitale, attivo, ha raggiunto la quota di 330 m ma vi sono molte altre manifestazioni di instabilità che determinano condizioni di rischio elevato, soprattutto per il sentiero escursionistico che ne attraversa la base. A titolo esemplificativo si riportano alcune immagini riferite ai dissesti seguiti agli eventi piovosi dell'autunno 2000, che coinvolsero un tratto di sentieristica di nuova realizzazione situato al margine sud-orientale dell'insenatura (Figg. 14a e 14b).

Le condizioni di generale dissesto del versante hanno imposto, da tempo, la chiusura dell'intero percorso pedonale compreso fra Corniglia e Manarola in attesa del completamento di numerosi interventi di difesa (reti di protezione, barriere paramassi, chiodature e bullonature) creando notevoli disagi ai frequentatori del Parco delle Cinque Terre. Si evidenzia, tuttavia che l'evoluzione dei dissesti lungo il versante, peraltro già avanzata, potrebbe a lungo termine creare nuove condizioni di rischio rendendo inefficaci gli interventi in via di realizzazione.

Fra il limite SE dell'insenatura e Punta Buonfiglio la costa si ripresenta alta, con falesie di altezza massima pari a circa 50 m nella zona di transizione fra le Argille e Calcari di Canetolo e le Arenarie Zonate, caratterizzata dall'affioramento di litotipi marnosi e calcarenitici fini. Le fratture principali (Fig. 11, stazione S6 e Fig. 15, stazione S7), orientate N - S (N177°), E - O (N82° - N92°), NNO - SSE (N149° - N157°) e, in subordine, ENE - OSO (N53° - N62°), sono causa con una certa frequenza di crolli.

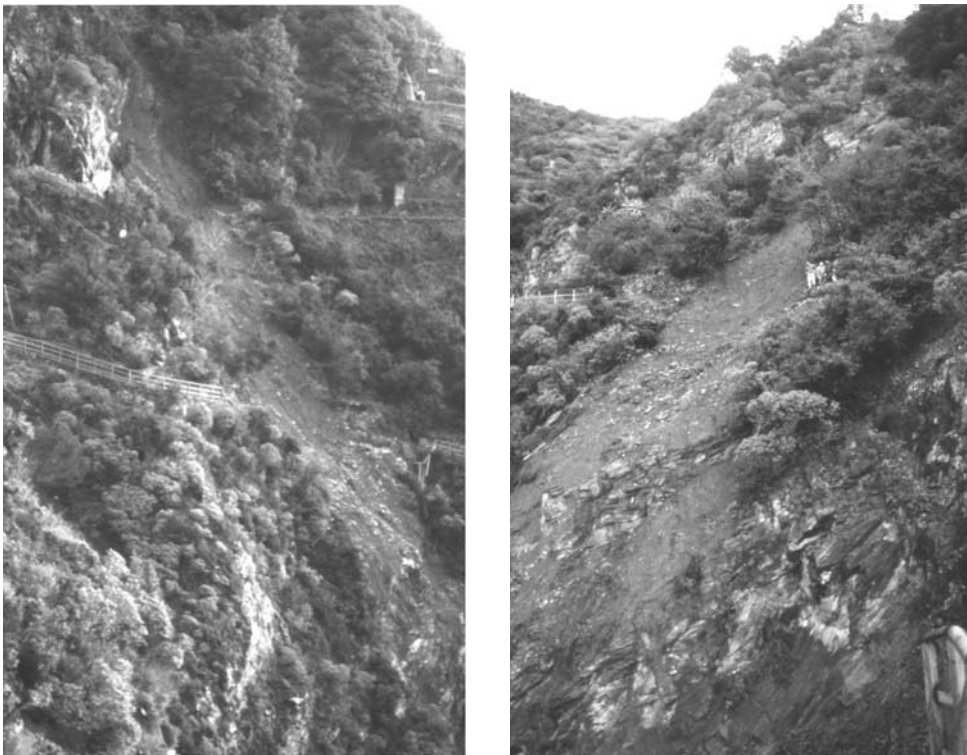


Figure 14a e 14b - Dissesti superficiali a N di Punta Buonfiglio, verificatisi in seguito ad eventi piovosi di forte intensità (autunno 2000), hanno coinvolto un tratto di sentieristica realizzato a fine anni '90.

Tratto Manarola - Riomaggiore

Nonostante la breve lunghezza (di circa 1 km) la costa (Fig. 15), ancora condizionata nelle sue linee generali dalla tettonica, è caratterizzata dalla presenza di nicchie di svuotamento di varia ampiezza (paleofrana di Manarola, frane di Via dell'Amore), che interessano, fino a quote comprese fra 75 m e 250 m, la porzione frontale della Costa di Corniolo.

La zona del litorale è situata in corrispondenza del contatto tettonico, subverticale, fra le Arenarie Zonate e le Argille e Calcari di Canetolo, coinvolte in un'anticlinale coricata a vergenza “tirrenica”, con asse orientato N150°, complicata da pieghe secondarie.

L'ubicazione delle principali frane antiche in corrispondenza del nucleo della piega, evidenzia l'esistenza di relazioni fra fenomeni d'instabilità ed assetto strutturale.

La fascia costiera, sede della ferrovia ottocentesca nonché della ben nota "Via dell'Amore", ha subito, in periodi differenti, profonde modificazioni antropiche. Le più evidenti interessano la paleofrana di Manarola (Terranova, 1984 e 1987) che presenta analogie morfologiche con la frana di Macereto (Fig. 7). Il ciglio raggiunge la quota di 240 m ed essa, anche in questo caso, conserva al centro parte dell'accumulo, anticamente terrazzato. Il piede è mascherato da imponenti opere di difesa della ferrovia ottocentesca, realizzate secondo lo schema ricorrente già visto in altri casi. Le principali cause predisponenti il verificarsi del fenomeno sono da ricercare nel complicato assetto strutturale, contraddistinto dalla presenza di un'ampia piega con asse NNO - SSE, dalla presenza di giunti di fratturazione orientati ENE - OSO (N58° - N72°), E - O (N83°); e NNO - SSE (162° - 167°) ad inclinazione e persistenza elevate (Fig. 15, stazioni S9 e S10), dall'acclività dell'antico pendio, che è possibile ritenere superiore all'80% e dall'esposizione all'azione del moto ondoso. L'originario ciglio di distacco presenta riattivazioni nella zona occidentale che, in passato, hanno richiesto la costruzione di opere a difesa della stazione ferroviaria di Manarola (Fig. 16).

A Est della precedente, la frana di Via dell'Amore (Terranova, 1984 e 1987), il cui ciglio raggiunge la quota di 200 m, interessa la zona di cerniera della piega cui si è fatto cenno in precedenza (Fig 17).

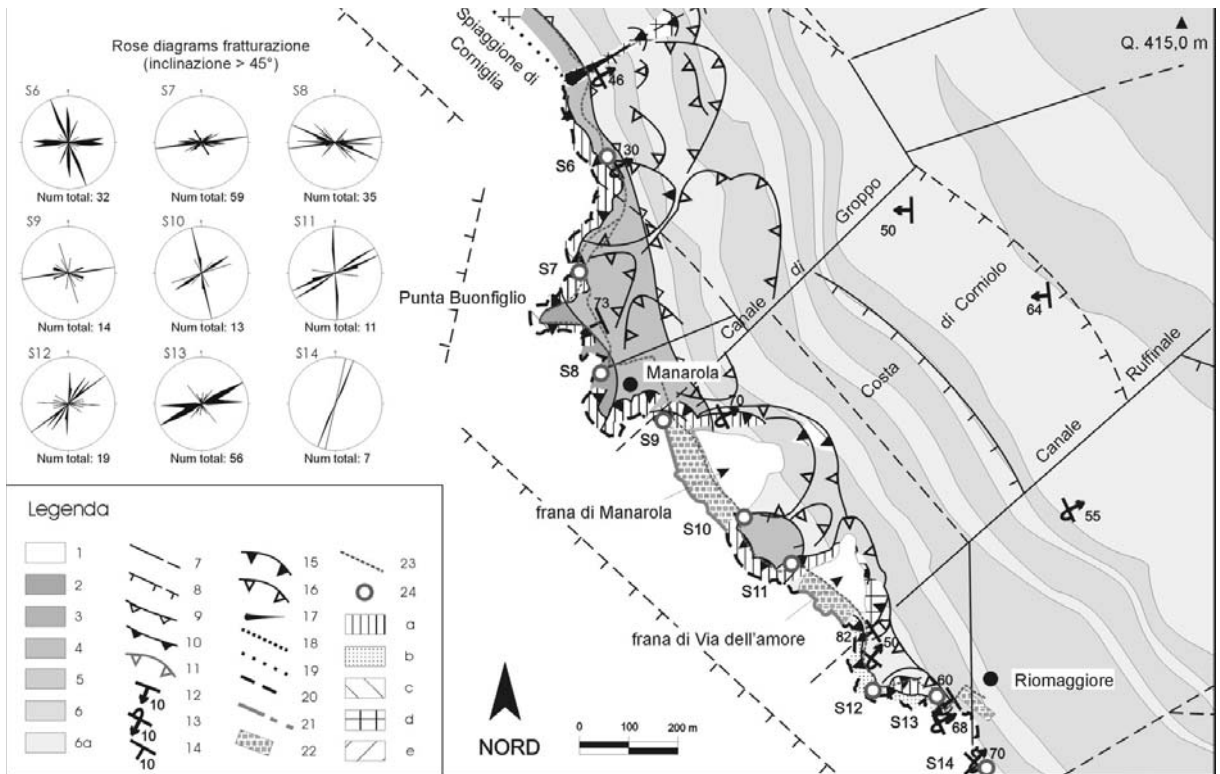


Figura 15 - Carta dei fenomeni d'instabilità costieri delle Cinque Terre fra Manarola e Riomaggiore.

Legenda: 1: depositi quaternari; 2: Arenarie di Ponte Bratica; 3: Calcari di Groppo del Vescovo; 4: Argille e Calcari di Canetolo; 5: Marne del Torrente Pignone; 6: Macigno; 6a: litofacies delle Arenarie Zonate; 7: lineamenti tettonici; 8: faglie dirette; 9: faglie inverse; 10: sovrascorrimenti; 11: limiti di faccette triangolari; 12: strati diritti; 13: strati rovesciati; 14: strati a polarità incerta; 15: cigli attivi; 16 cigli quiescenti; 17: direzione dei movimenti; 18: litorale sabbioso; 19: litorale ciottoloso o a blocchi; 20: litorale roccioso; 21: difese aderenti in buono/pessimo stato; 22: rilevato ferroviario; 23: sentiero di collegamento dei borghi delle 5 Terre; 24: stazione di rilievo strutturale. Classificazione frane (da Varnes, 1978) - In roccia: a: crollo; b: ribaltamento; c: scivolamento traslazionale; d: complessa. In detrito: e: colata. (La legenda è comune a tutte le carte dei fenomeni d'instabilità costieri).

La frana è il risultato di diversi tipi di rotture, riconducibili a scivolamenti traslazionali, ribaltamenti e crolli causati dall'interazione fra le giaciture di strato (altamente variabili) ed i principali sets di fratture, orientati N - S (N177° - N3°), ENE - OSO (N54° - N68°) ed E - O (N87° - N97°) (Fig. 15, stazioni S11, S12 e S13). Alla base del pendio poderosi muraglioni e scogliere proteggono la galleria ferroviaria fra le stazioni di Manarola e Riomaggiore. Recentemente sono stati portati a termine una serie di interventi attivi e passivi (ancoraggi, reti di protezione, barriere paramassi ed una galleria artificiale) finalizzati a garantire la fruibilità in sicurezza della Via dell'amore, più volte chiusa, in passato, a causa delle frequenti riattivazioni della frana. A breve distanza dalla precedente, in prossimità di Riomaggiore, ricorrenti fenomeni di crollo, ancora in corrispondenza della zona di cerniera della piega, hanno richiesto la realizzazione di altri interventi a difesa del percorso pedonale.



Figura 16 - Paleofrana di Manarola.

Conclusioni

Lo studio effettuato fornisce, attraverso la rappresentazione cartografica riportata nelle Figure 3, 7, 11 e 15, un quadro completo ed aggiornato dell'ubicazione e della tipologia dei fenomeni di instabilità che interessano il tratto costiero delle Cinque Terre, e dei loro rapporti con l'assetto geologico-strutturale e con le principali opere di difesa a mare. Tali fenomeni possono essere considerati espressione dell'elevata instabilità morfologica dell'area, dovuta, in primo luogo, all'elevata energia del rilievo ed alle conseguenze dell'erosione marina, determinate (nel primo caso) o favorite (nel secondo caso) dall'assetto tettonico post-pleiocenico che, attraverso, sistemi di faglie dirette in direzione "appenninica", ha causato lo sprofondamento del margine continentale.

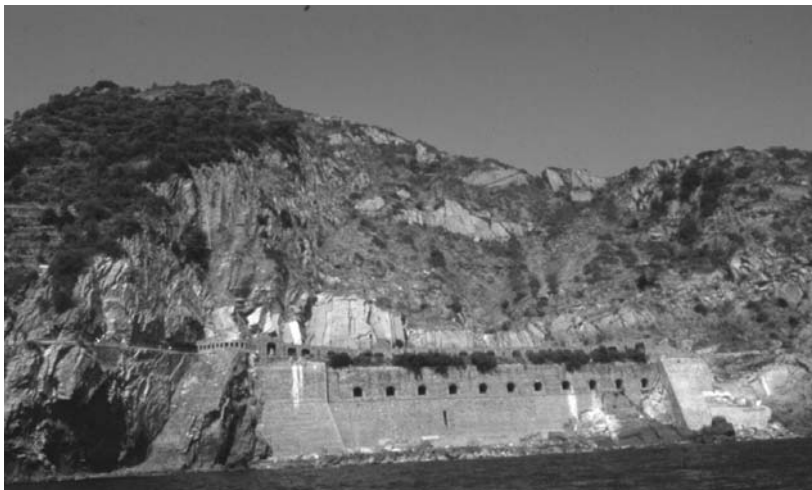


Figura 17 - Frana di Via dell'Amore.

La presenza di vallette in posizione sospesa rispetto all'attuale livello marino e l'ampia diffusione dei fenomeni di instabilità, sia antichi che recenti, testimoniano, come in altri casi nel levante ligure, il carattere giovanile di questo tratto costiero, lungo il quale risulta, spesso, problematica la distinzione fra gli effetti dovuti alla tettonica plio-quadernaria e quelli legati alle variazioni eustatiche quadernarie.

I fenomeni di instabilità, di età ed estensione assai varia, costituiscono, assieme alle modificazioni apportate con il terrazzamento agli accumuli più antichi, l'elemento più caratteristico del paesaggio della costa delle Cinque Terre. Le tipologie riscontrate sono estremamente varie e dipendono, in prevalenza, dai vari meccanismi di interazione fra erosione marina (attuale e progressiva), assetto strutturale, condizioni di fratturazione degli ammassi rocciosi e loro caratteristiche di resistenza e deformabilità. Lungo le falesie, attualmente, prevalgono fenomeni di crollo e scivolamenti traslazionali. Significative appaiono, in molti casi, le interazioni fra fenomeni di instabilità, dinamica del litorale ed attività antropiche. Le paleofrane di maggiore estensione, i cui corpi detritici sono stati, nella maggior parte dei casi (Macereto, Rodalabìa, Manarola), anticamente terrazzati, dalla seconda metà dell'800 sono attraversati al piede dalla ferrovia del litorale ligure, tutt'oggi in attività. Ciò ha comportato la realizzazione di numerose opere di difesa che, se da un lato hanno notevolmente migliorato la stabilità degli accumuli, dall'altro, impedendo il naturale rifornimento di detriti alle, seppure rare, spiagge della zona, ne stanno determinando la progressiva erosione. Un'eccezione, in questo senso, è rappresentata dal potente accumulo della frana di Guvano, dove l'abbandono della sede ferroviaria, realizzata al piede, e delle relative opere di difesa a mare, ne rende possibile, allo stato attuale, l'erosione da parte del moto ondoso. Agli effetti indotti dalle opere connesse alla difesa della linea ferroviaria vanno aggiunti quelli degli interventi, assai più recenti e tutt'ora in corso di realizzazione, finalizzati alla messa in sicurezza dei percorsi escursionistici che interessano, pressoché nella sua totalità, il tratto fra Corniglia e Riomaggiore. In questo caso non deve essere sottovalutato il fatto che le opere di difesa attive e passive (ancoraggi, reti di protezione, barriere paramassi e gallerie artificiali), già realizzate o in via di esecuzione, determinerà una ulteriore riduzione degli apporti detritici che dai versanti raggiungono il mare con conseguenze negative sull'alimentazione delle spiagge della zona. Vi sono, inoltre, da considerare gli effetti dell'impatto di tali opere sotto il profilo paesaggistico. La gestione del problema risulta assai delicata poiché l'area è interessata, da diversi anni, da una crescente pressione turistica cui sono legate le attività economiche dell'area.

Bibliografia

- AA.VV. (1983) - *Neotectonic map of Italy*. C.N.R. Progetto finalizzato Geodinamica. Sottoprogetto Neotettonica.
- Abbate E. (1969) - *Geologia delle Cinque Terre e dell'entroterra di Levante (Liguria Orientale)*. Mem. Soc. Geol. It., 8: 923-1014.
- Brandolini P. e Terranova R. (1995) - *Esempi di dissesti geomorfologici dei versanti liguri e loro riflessi sulla conservazione del suolo*. Mem. Accad. Lunig. di Scienze "G. Capellini", LXIV-LXV (1994-1995) - Scienze naturali fisiche e matematiche.
- Cevasco A., Ferrari M., Fierro G. e Nosengo S. (2000) - *Fenomeni d'instabilità della costa alta e rocciosa fra Riva Trigoso e Framura (Liguria Orientale): risultati preliminari*. Studi costieri, 3 (2000): 71-83.
- Corradi N., Fanucci F., Fierro G., Firpo M., Mirabile L. e Piccazzo M. (1984) - *La piattaforma continentale ligure: caratteri, struttura ed evoluzione*. Rapporto tecnico finale del Progetto finalizzato "Oceanografia e fondi marini", C.N.R., Roma, pp. 34.
- De Stefanis A., Marini M., Terranova R. e De Luigi G. (1978) - *I movimenti franosi di Guvano e Rodalabìa nelle Cinque Terre e i loro riflessi sulla morfologia della costa ligure e sugli insediamenti*. Mem. Soc. Geol. It., 19: 161-167.
- De Stefanis A., Marini M. e Terranova R. (1985) - *Indagini geologiche e geomorfologiche in Liguria con particolare riguardo alle condizioni di franosità*. Memoria riepilogativa della U.O. 37. C.N.R., P.F. Conservazione del Suolo, Sottoprogetto Fenomeni Franosi. "Geologia Applicata e Idrogeologia", XVIII, 3: 1-15.
- Fanucci F. e Nosengo S. (1978) - *Rapporti fra la neotettonica del versante marittimo dell'Appennino Ligure e del margine continentale e fenomeni morfogenetici*. Boll. Soc. Geol. It., 96: 41-51
- Federici F. (1980) - *Note illustrative della neotettonica del foglio 95 - La Spezia e del margine del foglio 84 - Pontremoli*. C.N.R., Progetto finalizzato Geodinamica, 356: 1345-1364.

- Federici P.R. e Raggi G. (1979) - *Rapporto preliminare sulla neotettonica del Foglio 95 (La Spezia)*. C.N.R., P.F. Geodinamica, Contributi preliminari alla carta neotettonica d'Italia. AB 3, Pubbl. n. 251: 597-602.
- Federici P.R., Baldacci F., Petresi A. e Serani A. (2001) - *Atlante dei Centri Abitati Instabili della Liguria*. I. Provincia della Spezia. C.N.R. G.N.D.C.I, Regione Liguria, Università degli Studi di Pisa.
- Giammarino S. e Giglia G. (1990) - *Gli elementi strutturali della piega di La Spezia nel contesto geodinamico dell'Appennino Settentrionale*. Boll. Soc. Geol. It., 109: 683-692.
- Guidoni G. (1854) - *Cenni sulla Lavina o frana di Corniglia ed il curioso sollevamento di una scogliera marina di fronte alla Lavina stessa*. La Spezia, 1854.
- Guidoni G. (1902) - *Una nota inedita sulla lavina di Corniglia*. Tip. Eredi Argiroffo, La Spezia 1902.
- Raggi G. (1985) - *Neotettonica ed evoluzione paleogeografica plio-pleistocenica del bacino del fiume Magra*. Mem. Soc. Geol. It., 30: 35-62.
- Direzione Tecnica Governativa (1880) - *La Ferrovia del Litorale Ligure da Massa al confine francese*. Dal Giornale del Genio Civile - anni 1878-79-80, Roma.
- Servizio Geologico d'Italia (2003) - *Carta geologica d'Italia - Foglio 248 - La Spezia*. Scala 1:50.000.
- Terranova R. (1984) - *Aspetti geomorfologici e geologico-ambientali delle Cinque Terre: rapporti con le opere umane (Liguria Orientale)*. Studi e Ricerche di Geografia, VII, 1: 39-90.
- Terranova R. (1987) - *Guida all'escursione lungo la costa della Liguria orientale (25/6/87)*. Gr. Naz. Geogr. Fis. e Geomorf., Sestri Levante, 22 - 25 giu.1987. Atti della Riunione - Guida alle escursioni. In: Quaderni Ist. Geol. Univ. Genova, 5: 159 - 231.
- Terranova R. (1989) - *Il paesaggio costiero agrario terrazzato delle Cinque Terre in Liguria*. Studi e Ricerche di Geografia, XII, 1: 1-58.
- Varnes D.J. (1978) - *Slope movement type and processes*. In: Schuster R.L. & Krizek R.J. (Eds) "Landslides analysis and control". Transportation Research Board, Special Rept. 176, Nat. Acad. of Sciences, pp. 11-33.
- Zolfanelli C. e Santini V. (1874) - *Guida alle Alpi Apuane*. Multigrafica Ed., Roma 1983.

Ricevuto il 31/05/2007, accettato il 20/08/2007.

La compatibilità chimica nel ripascimento con sabbie relitte: il caso degli elementi in traccia a Montalto di Castro (VT).

Daniela Paganelli¹, Chiara Maggi¹, Massimo Gabellini¹

¹ICRAM, Via di Casalotti, 300 - 00166 Roma

Riassunto

Nell'ambito dell'utilizzo delle sabbie relitte per il ripascimento dei litorali in erosione, un tema importante è quello della compatibilità chimica delle sabbie in relazione alle caratteristiche geologiche e geochemiche delle aree coinvolte.

L'ICRAM, in tale ambito, ha sviluppato un Protocollo di Monitoraggio che, per quanto riguarda la caratterizzazione chimica, prevede l'analisi dei sedimenti superficiali dell'area di dragaggio. La movimentazione dei sedimenti, infatti, può comportare, in caso di contaminazione, la rimobilizzazione di specie chimiche con possibili effetti sull'ecosistema marino.

In questo lavoro viene presentato lo studio delle sabbie relitte presenti al largo di Montalto di Castro (VT), utilizzate per il ripascimento dell'arenile di Tarquinia (VT). Inizialmente sono state effettuate le analisi chimiche della coltre pelitica secondo lo schema sperimentato in altre aree della piattaforma laziale. Poiché i risultati ottenuti hanno evidenziato alcune anomalie di concentrazione confermando solo parzialmente i dati di letteratura relativi alla distribuzione degli elementi in traccia, sono state eseguite ulteriori indagini specifiche per approfondire sia gli aspetti ambientali relativi alla movimentazione dei sedimenti pelitici superficiali, sia la compatibilità chimica delle sabbie sottostanti da destinare al ripascimento.

Sui sedimenti della coltre pelitica sono state condotte analisi di speciazione mediante estrazioni sequenziali.

Parole chiave: ripascimento, compatibilità chimica, elementi in traccia, speciazione, mar Tirreno.

Abstract

In beach nourishment activities using relict sands, chemical compatibility related to geological and geochemical characteristics of the area interested by these activities is an important topic.

Recently ICRAM has developed an Environmental Monitoring Protocol related relict sands dredging for beach nourishment that involves in particular the superficial sediments analysis in the dredging area. The sediment removing, in fact, can cause the resuspension of chemical species with possible effects on marine ecosystems.

In this paper we report the study of the relict sands deposit located off the coasts of Montalto di Castro (Latium, Italy) used for the nourishment along Tarquinia beaches (Latium, Italy). The chemical analysis of pelitic superficial sediments has been carried out according to the monitoring plan used in the other areas of the Latium continental shelf. Since the results obtained had highlighted some anomalies of concentration, partly confirmed by the literature data regarding the trace elements distribution, further specific analyses were carried out in order to investigate environmental aspects of the pelitic sediments removal and the chemical compatibility of the dredging sands below. For this reason, chemical speciation analysis on the pelitic superficial sediments by means of sequential extraction procedure were carried out.

Keywords: beach nourishment, chemical compatibility, trace metals, speciation analysis, Tyrrhenian sea.

Introduzione

Il ripascimento delle spiagge con sabbie relitte consiste nella ricostruzione degli arenili erosi mediante l'impiego di sabbie marine presenti, a profondità variabili, lungo la piattaforma continentale. Le sabbie relitte sono depositi sabbiosi sommersi formati nel passato geologico, quando il livello del mare era più basso dell'attuale; possono essere affioranti sul fondo del mare oppure essere coperte da sedimenti fini di deposizione recente. Il ripascimento mediante sabbie relitte comprende la fase di estrazione delle sabbie (dragaggio) e quella di ripascimento vero e proprio, che interessano rispettivamente l'area in cui è localizzato il deposito sabbioso che si intende sfruttare (area di dragaggio) e l'area di ripascimento, che coincide con le spiagge da ricaricare. L'impatto di tali attività può generare, sia nell'area di dragaggio sia in quella di ripascimento, diversi effetti, come modificazioni morfologiche e sedimentologiche del fondo, alterazione delle caratteristiche chimico-fisiche della colonna d'acqua (aumento della torbidità) e disturbo degli organismi necto-bentonici. In particolare, qualora il sedimento superficiale fosse contaminato, la risospensione di rilevanti quantità di sedimento fine potrebbe comportare il rilascio di contaminanti con conseguenti effetti negativi sull'ecosistema marino (Hitchcock et al., 1998; Newell et al., 1998).

Lo studio delle caratteristiche tessiturali e chimiche dei sedimenti dell'area di dragaggio ha l'obiettivo di valutare la qualità dei sedimenti superficiali; il sedimento sottile recente che spesso ricopre le sabbie relitte, per sua stessa natura (elevata superficie specifica), rappresenta un substrato ideale per l'accumulo di contaminanti, e la risospensione, che si verifica quando lo *shear stress* è sufficiente a vincere la coesione del materiale, è un importante meccanismo per la reintroduzione di contaminanti nella colonna d'acqua e nel ciclo del particolato (Kim et al., 2004).

Un'importante considerazione va fatta relativamente alla distribuzione di elementi minori ed in traccia. La concentrazione degli elementi nei sedimenti marini è legata sia alle caratteristiche mineralogiche e geochemiche del sedimento, sia agli eventuali contributi di origine antropica. La presenza di concentrazioni rilevanti di una specie chimica nel sedimento, pertanto può dipendere, esclusivamente, dalle caratteristiche geolitologiche dei bacini versanti, come accade in presenza di determinate province geochemiche. E' questo il caso del dragaggio delle sabbie relitte presenti lungo la piattaforma continentale tirrenica al largo di Montalto di Castro (VT) in cui la vicinanza della provincia mercurifera toscana a nord (monte Amiata) e delle vulcaniti della serie alcali-potassica laziale più a sud, ha determinato la presenza, lungo la piattaforma continentale del Lazio settentrionale, di concentrazioni elevate per Hg, As e Pb (Branca et al., 1996; Niccolai et al., 1993).

Il quadro normativo di riferimento

Il quadro normativo di riferimento attualmente vigente in Italia, specifico per le attività di dragaggio delle sabbie relitte a fini di ripascimento, è ancora parzialmente *in itinere*.

L'art. 109 del decreto legislativo 152/2006 ⁽¹⁾ regola l'immersione in mare di materiale derivante da attività di escavo dei fondi marini purché ne sia dimostrata la compatibilità ambientale e "l'innocuità". Il ripascimento viene individuato come scelta prioritaria per la destinazione d'uso del materiale proveniente dall'escavo dei fondi marini. In attesa dell'allegato tecnico previsto dall'art. 109 per la regolamentazione di tutte le attività di movimentazione dei fondi marini, le attività di movimentazione dei sedimenti a fini di ripascimento rimangono disciplinate dal Decreto Ministeriale 24 gennaio 1996.

La Legge 179/2002 ed il conseguente passaggio di competenze dallo Stato alle Regioni, stabilisce che l'ente competente per l'istruttoria e il rilascio dell'autorizzazione ad interventi di ripascimento della fascia costiera sia la Regione ⁽²⁾.

Un ultimo accenno riguarda la normativa più propriamente connessa alla qualità del sedimento marino, in particolare il decreto ministeriale 367/2003 ⁽⁴⁾. Nel decreto vengono fissati gli standard di qualità per i sedimenti marino-costieri relativamente ad alcune sostanze pericolose e prioritarie individuate ai sensi del regolamento 2455/2001/EC; si precisa, inoltre, che tali valori non sono vincolanti, ma devono supportare le misure da intraprendere per la tutela del corpo idrico, e decadono qualora il superamento dello standard si verifici in corrispondenza di accertate province geochemiche. Il D.M. 367/2003, sebbene non specifico per valutare la conformità di sedimenti di piattaforma, è tuttora l'unico riferimento legislativo nazionale per la tutela dell'ecosistema marino.

L'attività dell'ICRAM e la proposta di Protocollo di Monitoraggio

L'ICRAM, sin dal 1999, ha eseguito studi di compatibilità ambientale per il ripascimento mediante sabbie relitte, arrivando, in varie tappe, alla proposta di uno specifico Protocollo di Monitoraggio (Nicoletti et al., 2002, 2006; Paganelli et al., 2005). Tale protocollo prevede un programma di indagini articolato in due capitoli principali: lo studio preliminare di caratterizzazione delle aree interessate all'intervento e il monitoraggio, da condursi sia durante le attività di movimentazione delle sabbie sia dopo il compimento delle attività in oggetto, al fine di valutare gli effetti indotti sull'ambiente. Lo studio di caratterizzazione comporta indagini a diverse scale di approfondimento: una fase di caratterizzazione dell'area vasta, possibilmente estesa all'unità fisiografica, che può essere condotta anche solo su base bibliografica (Fase A), una fase di caratterizzazione delle macroarea (Fase B), che deve essere basata su dati recenti, una fase di dettaglio (Fase C1), da condurre prima dell'inizio dei lavori sull'area oggetto di intervento (quando ormai è stato definito con certezza il corridoio di dragaggio) e nelle sue immediate vicinanze (Fig. 1).

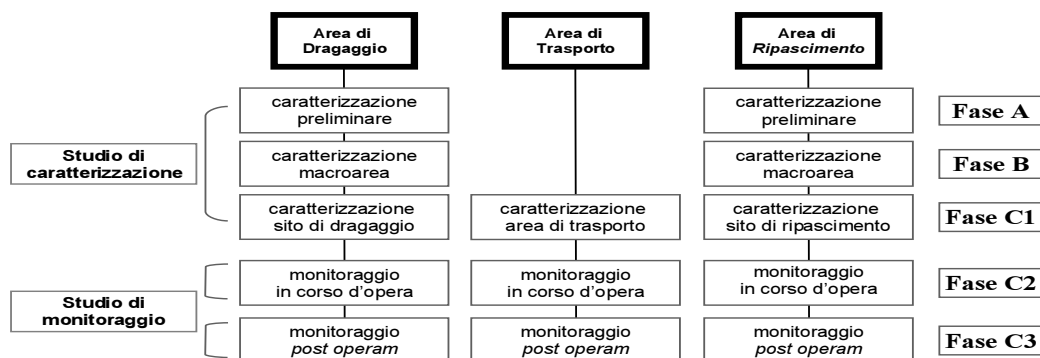


Figura 1 - Schema del protocollo di monitoraggio per lo studio degli aspetti ambientali del dragaggio di sabbie relitte a fini di ripascimento (da Nicoletti et al., 2006, modificato).

I parametri da indagare sono quelli riportati nel Decreto Ministeriale 24 gennaio 1996, integrati e corretti alla luce di quanto riportato dalla letteratura scientifica nazionale e internazionale e sulla base delle esperienze maturate dall'ICRAM nella conduzione diretta e nel coordinamento di attività sperimentali (APAT-ICRAM, 2006; Nicoletti et al., 2006). Tali parametri sono: morfologia e batimetria del fondo, caratteristiche fisico-chimiche dei sedimenti, idrologia e dinamica delle masse d'acqua, popolamento macrobentonico e popolamento ittico demersale.

La caratterizzazione chimica

La caratterizzazione chimica dell'area di dragaggio è un punto chiave per il ripascimento mediante sabbie relitte; essa include lo studio della qualità dei sedimenti superficiali (sabbiosi e/o pelitici) che devono essere movimentati, al fine di valutare la loro compatibilità in relazione alle caratteristiche geologiche e geochemiche delle spiagge da ripascere.

I sedimenti sabbiosi, per le caratteristiche granulometriche (sedimento grossolano), geologiche (depositi relitti) e giaciture del deposito non presentano in genere fenomeni di contaminazione. In effetti, la copertura pelitica, quando presente, protegge le sabbie da possibili inquinanti.

Gli aspetti che devono quindi essere studiati sono principalmente quelli legati alla risospensione del sedimento superficiale, che in caso di sedimenti pelitici potrebbe avere effetti non trascurabili sull'ambiente, anche in considerazione della grande affinità di metalli e contaminanti in genere per le particelle fini.

Il Protocollo di Monitoraggio inizialmente proposto (Nicoletti et al., 2002; Paganelli et al., 2005) prevedeva che la caratterizzazione chimica dei sedimenti superficiali venisse condotta mediante la determinazione del contenuto totale di metalli e composti organici. A tal riguardo bisogna però sottolineare come i soli valori di abbondanza totale non permettano né di risalire alle singole specie chimiche, né di differenziare l'apporto di origine naturale da quello di origine antropica. Questo è particolarmente vero nel caso degli elementi in traccia, che possono essere presenti nei sedimenti marini anche in concentrazioni (totali) assai elevate ma riconducibili a condizioni naturali particolari, come l'affioramento nell'entroterra di specie minerali arricchite in determinati elementi chimici (pro-

vince geochimiche). In questo caso, per esempio, i valori di abbondanze totali, seppure elevati, non sono rappresentativi di una condizione di inquinamento. Inoltre se gli elementi in traccia sono presenti sotto forma difficilmente mobilizzabile, con le normali variazioni dei parametri chimico-fisici attese a seguito della movimentazione delle sabbie, il loro impatto ambientale risulta meno significativo.

Nell'ambito di un progetto di prelievo di sabbie relitte presenti al largo di Montalto di Castro (VT), da utilizzare per il ripascimento del litorale di Tarquinia (VT), l'ICRAM ha ritenuto necessario condurre indagini più approfondite, utilizzando metodiche analitiche in grado di discriminare la ripartizione di alcune specie chimiche nelle diverse fasi del sedimento. Inoltre, al fine di garantire la qualità della sabbia da destinare al ripascimento, è stato deciso di effettuare specifiche analisi chimiche anche sulle sabbie relitte. I valori di abbondanze totali ottenuti per le sabbie relitte sono stati infine valutati rispetto a quanto stabilito nel decreto 367/2003 e confrontati con i valori di concentrazione ottenuti dalle analisi chimiche condotte sui campioni provenienti dalla spiaggia da ripascere.

Il caso delle sabbie relitte di Montalto di Castro (VT)

In questa area è nota dalla letteratura (Fase A del Protocollo di Monitoraggio, ICRAM, 2002) la presenza di anomalie geochimiche di alcuni elementi quali Hg, Pb ed alcuni elementi del gruppo del Fe, per l'influenza sia del sistema mercurifero del monte Amiata (Toscana), sia delle formazioni vulcaniche della serie K-alkalina (Fig. 2).

La caratterizzazione chimica dell'area di dragaggio (Fase B del Protocollo di Monitoraggio, Maggi et al., 2004) ha previsto, oltre alle indagini sui contaminanti organici, la determinazione del contenuto totale di metalli ed elementi in traccia (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) mediante mineralizzazione con miscela di acidi forti a caldo, metodica US EPA 3052 e la successiva determinazione analitica con spettrometria di assorbimento atomico, su 36 campioni di sedimento superficiale (Fig. 3).

I risultati hanno confermato quanto riportato in letteratura, evidenziando anomalie di concentrazione per alcuni elementi (Ni, Pb, As, Hg e Cr), probabilmente non riferibili a fenomeni di contaminazione antropica, ma in accordo con le caratteristiche geochimiche dei bacini versanti.

La successiva caratterizzazione di dettaglio del sito di dragaggio (Fase C1 del Protocollo di Monitoraggio, ICRAM, 2004) ha focalizzato l'attenzione sull'area che sarebbe stata effettivamente dragata; sono state identificate 4 stazioni all'interno dell'area i cui sedimenti superficiali sono stati caratterizzati in base ai già citati parametri chimico-fisici (Fig. 4).

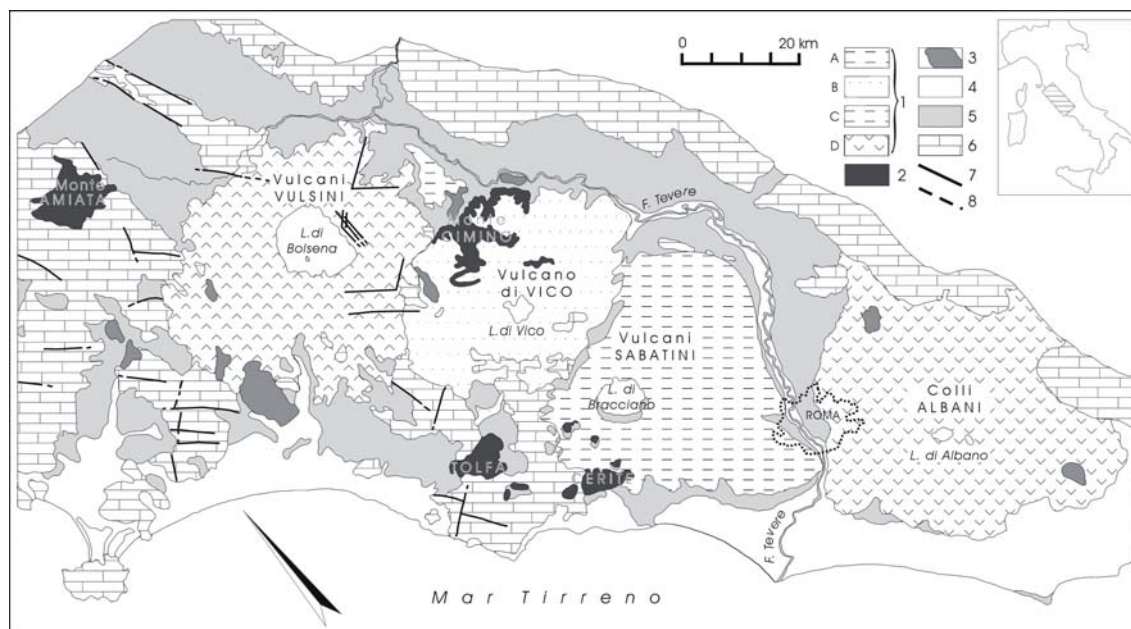


Figura 2 - Schema geologico del dominio vulcanico peritirrenico laziale. Legenda: 1) Vulcaniti alcalino potassiche (Quaternario) (a - Distretto Vulcanico dei Monti Vulsini; b - Distretto Vulcanico dei Monti Vicani; c - Distretto Vulcanico dei Monti Sabatini; d - Distretto Vulcanico dei Colli Albani); 2) Vulcaniti acide (Pliocene-Pleistocene); 3) Travertino; 4) Sedimenti continentali e costieri (Quaternario); 5) Sedimenti argillosi e sabbiosi (Miocene superiore-Pliocene-Pleistocene inferiore); 6) Successioni prevalentemente sedimentarie (Carbonifero-Miocene inferiore); 7) Faglie; 8) Faglie sepolte. (da Locardi et al., 1976, ridisegnato).

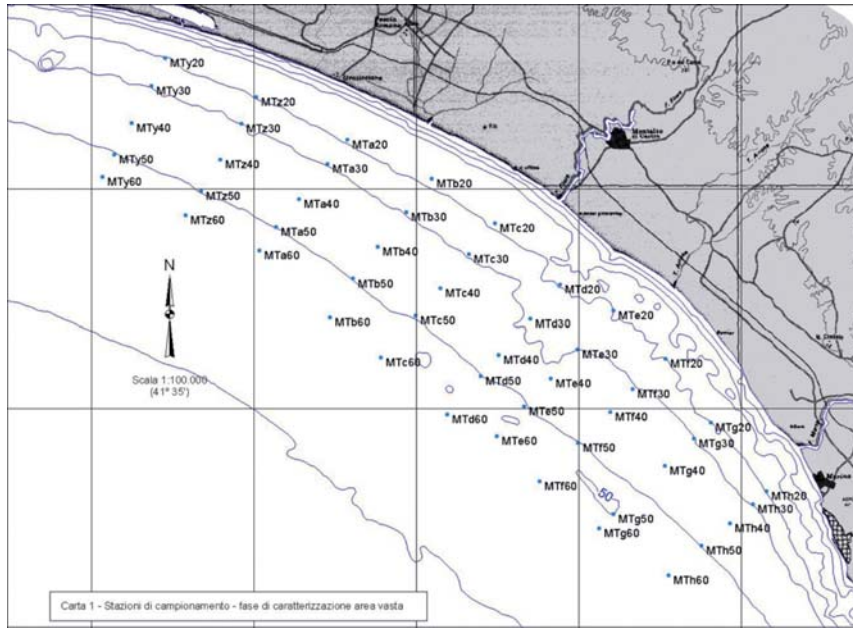


Figura 3 - Piano di campionamento per la caratterizzazione chimica dei sedimenti superficiali, Fase B.

E' importante sottolineare che i risultati ottenuti in questa fase sono quelli vincolanti per la movimentazione delle sabbie, ai sensi del D.M. 24 gennaio 1996. Nell'area di dettaglio non sono state individuate particolari anomalie di concentrazione, se non qualche valore relativamente più alto per As e Hg. Dal confronto con i valori riportati nel D.M. 367/2003 relativo alla fissazione di standard di qualità per i sedimenti marini, è emerso che As e Hg eccedevano il valore stabilito dal decreto. E' da ricordare che il D.M. 367/2003, sebbene non specifico per valutare la conformità di sedimenti di piattaforma, è tuttora l'unico riferimento legislativo nazionale per valutare la tutela dell'ecosistema marino.

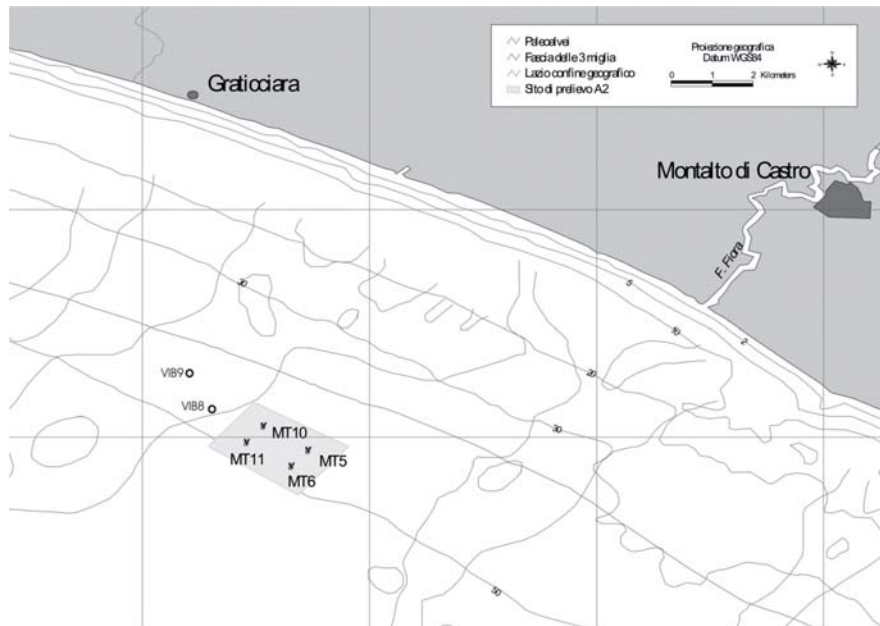


Figura 4 - Piano di campionamento seguito durante la Fase C1, con le 4 stazioni interne al poligono che individua l'area di dragaggio e la localizzazione delle carote prelevate nella successiva fase di approfondimento (VIB8 e VIB9).

In un precedente caso di studio, condotto dall'ICRAM (2001) lungo la piattaforma continentale laziale, al largo di Anzio (Roma), il Protocollo utilizzato, di fatto coincidente con quello seguito per il dragaggio delle sabbie relitte di Montalto di Castro (VT) e sin qui riportato, era risultato idoneo e sufficiente a descrivere le caratteristiche ambientali dell'area studiata, relativamente agli spetti chimici, senza bisogno di ulteriori specifiche indagini.

Per Montalto di Castro, considerata anche la tossicità di As e Hg, la cui concentrazione eccedeva il limite riportato nel D.M. 367/03, si è deciso di integrare il Protocollo di Monitoraggio, con indagini più approfondite, su 2 carote interne al deposito, subcampionate in 4 intervalli (Tab. 1).

Tali indagini avevano lo scopo di studiare, nei sedimenti della copertura pelitica, la ripartizione di Hg e As fra le frazioni a diversa mobilità. A tal fine è stata effettuata una sequenza di estrazioni con solventi a potere estraente crescente (Tessier et al., 1979; Maggi et al., 2006), condotta solo su campioni di sedimento superficiale, provenienti dai carotaggi, con una percentuale rilevante di frazione fine. L'estrazione sequenziale permette, infatti, di distinguere le frazioni più mobili di metallo da quelle residue insolubili.

Tabella 1 - Livelli di sedimento campionato nelle due carote VIB8 e VIB9.

Carota VIB8		Carota VIB9	
Campione	Profondità (m)	Campione	Profondità (m)
VIB8(0.5m)	0.5	VIB9(0.7 m)	0.7
VIB8(0.9 m)	0.9	VIB9(1.5 m)	1.5
VIB8(1.5 m)	1.5	VIB9(2.0 m)	2
VIB8(1.9 m)	1.9	VIB9(3.7 m)	3.7

Allo stesso tempo è stata valutata la compatibilità chimica tra i sedimenti provenienti dall'area di prelievo e quelli dell'arenile oggetto di ripascimento, confrontando le abbondanze totali rinvenute nei campioni di sabbie relitte (campioni profondi delle carote) e quelle rinvenute nei campioni di sabbia provenienti dal litorale di Tarquinia. I campioni di sedimento superficiale, VIB8(0.5 m) e VIB9(0.7 m), presentavano un contenuto totale di Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Hg, Cd, As e Zn coerente con i valori riportati in letteratura per la piattaforma laziale (Branca et al., 1996; Cosma et al., 1994; Leoni et al., 1991, 1993; Niccolai et al., 1993); in particolare il tenore di Hg risultava, ad eccezione del campione VIB8 (0.5 m), sempre inferiore al valore di 0,3mg/kg, fissato come standard di qualità ambientale del D.M. 367/2003, mentre il tenore di As superava il valore di 12 mg/kg, fissato nel suddetto decreto, anche in alcuni campioni di sabbia.

Studiando il contenuto di metallo lungo le due carote di sedimento si è osservato che il sedimento superficiale, in cui era presente una quantità maggiore di pelite, risultava caratterizzato da valori più elevati rispetto a quelli rilevati nei campioni più profondi (Tab. 2); in particolare, il campione VIB8(0.5), in cui era presente la frazione pelitica prevalentemente argillosa, presentava tenori più elevati rispetto al campione VIB9(0.7 m).

Tabella 2 - Percentuale di pelite e abbondanze totali di metalli pesanti (mg/kg s.s.) nei campioni delle carote.

Campioni	Pelite (%)	Hg	Cd	Cr	Cu	Fe (%)	Mn	As	Ni	Pb	Zn
VIB8 (0.5 m)	57,20	0,4990	0,1142	43,06	20,32	4,1646	566,18	58,30	23,37	23,91	62,89
VIB8 (0.9 m)	0,00	0,0436	0,0407	11,06	3,38	1,3989	408,52	8,27	7,22	4,73	16,66
VIB8 (1.5 m)	0,00	0,0497	0,1852	9,92	4,08	2,7115	580,03	5,34	9,86	4,49	43,33
VIB8 (1.9 m)	0,00	0,0426	0,0416	8,99	4,44	2,2022	441,69	20,31	7,51	4,59	25,26
VIB9 (0.7 m)	21,50	0,1716	0,0586	27,28	9,83	4,2738	658,35	34,11	16,21	11,30	52,24
VIB9 (1.5 m)	0,00	0,0452	0,0458	7,34	4,34	4,3504	600,12	4,72	8,15	5,41	29,51
VIB9 (2.0 m)	0,00	0,0318	0,0483	10,35	2,94	3,0966	514,08	18,05	7,86	3,59	32,09
VIB9 (3.7 m)	9.50	0,0811	0,0490	22,53	5,53	3,6942	659,17	18,88	10,68	5,15	41,16

Le estrazioni sequenziali effettuate sui campioni superficiali hanno evidenziato che nel campione VIB8(0.5) (Fig. 5) più del 50% del contenuto totale di Hg si trovava nella frazione residua e insolubile (anche la frazione estratta con acido nitrico rappresenta forme chimiche decisamente poco mobili).

Per quanto riguarda l'As (Fig. 6) nel campione VIB8(0.5) il 50 % del metallo risultava sottoforma di residuo insolubile, tenendo presente che l'aliquota di metallo estratta con acido nitrico raggiungeva il 14% nel campione VIB8(0.5 m) e il 23% nel campione VIB9 (0.7 m).

Per quanto riguarda i risultati relativi alla determinazione delle abbondanze totali sulle sabbie relitte (campioni profondi delle carote), tutti i campioni analizzati presentavano valori analoghi a quelli riportati in letteratura per la piattaforma laziale e, ad eccezione dell'As, sempre al di sotto degli standard di qualità ambientale fissati nel D.M. 367/2003.

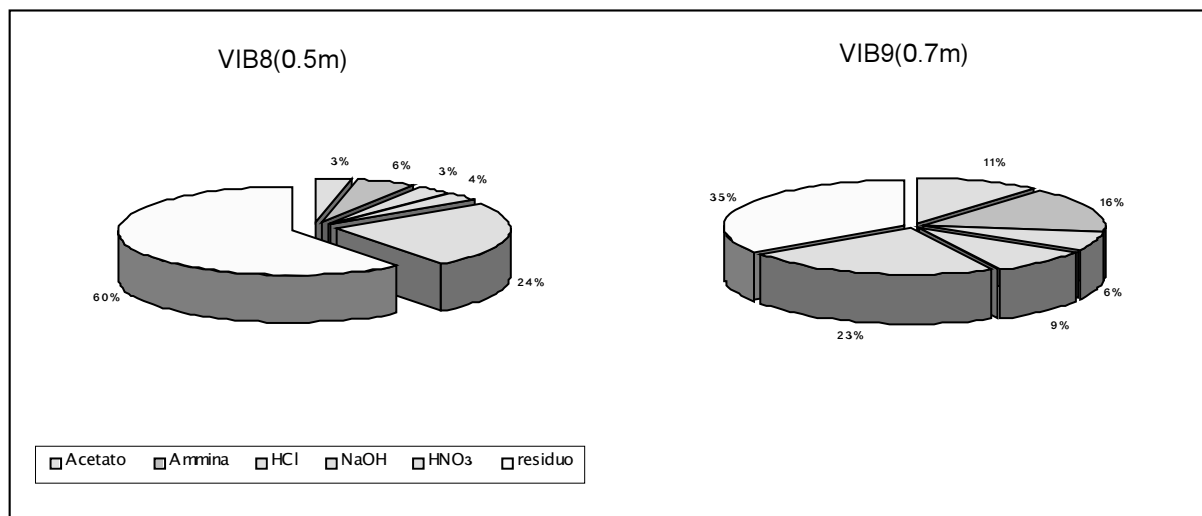


Figura 5 - Ripartizione percentuale delle singole fasi per il Hg nei due campioni di sedimento superficiale.

D'altra parte come messo in evidenza da precedenti studi specifici sulla piattaforma continentale del Tirreno centrale la concentrazione di As presenta un range naturale piuttosto ampio con massimi fino a 80 mg/kg s.s. (ICRAM, 2002).

Una situazione analoga è stata rilevata anche nei sedimenti di spiaggia (Tab. 3) in cui, ad eccezione dell'As, tutti gli altri metalli esaminati presentavano valori di concentrazione bassi e sempre inferiori agli standard di qualità ambientali riportati nel Decreto 367/2003.

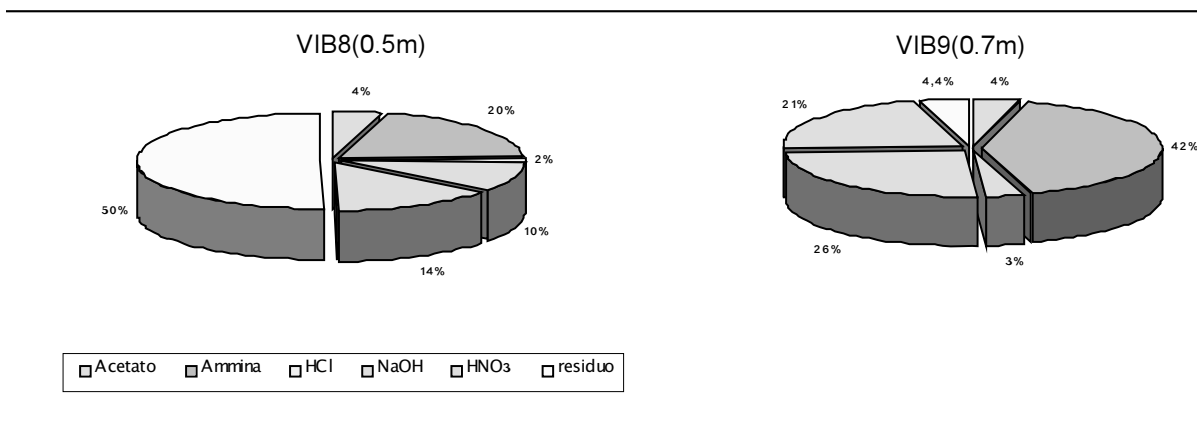


Figura 6 - Ripartizione percentuale delle singole fasi per l'As nei due campioni di sedimento superficiale.

Anche il Hg è risultato presente in concentrazione molto bassa, probabilmente a seguito del comportamento geochimico proprio di questo metallo che predilige le frazioni più sottili di sedimento (Barghigiani et al., 1996). Del resto già Anselmi et al., (1976), aveva osservato l'assenza del minerale cinabro, il maggior responsabile delle elevate concentrazioni di mercurio nella zona, dalle spiagge del Lazio settentrionale, sebbene nella stessa area ne fosse stata accertata la presenza nei sedimenti di piattaforma.

Con queste indagini specifiche è stato possibile osservare che le concentrazioni più elevate rispetto ai valori fissati nel D.M. 367/2003 riscontrate nei campioni superficiali provenienti dai 2 carotaggi, oltre ad essere in accordo con le caratteristiche granulometriche del sedimento, non destavano preoccupazione in quanto il metallo risultava "bloccato" per più del 50% sottoforma non mobile. Inoltre, le caratteristiche chimico-fisiche dei sedimenti appartenenti al deposito sabbioso che si intendeva coltivare erano compatibili con quelle riscontrate nei sedimenti attualmente presenti sulla spiaggia da ripascere.

Tabella 3 - Abbondanze totali (mg/kg s.s.) nei campioni di sabbia prelevati sulla spiaggia da ripascere (Tarquinia, VT). Fra parentesi è indicata la profondità di prelievo del campione.

Campione	Hg	Cd	Cr	Cu	Fe (%)	Mn	As	Ni	Pb	Zn
TAR 10 (0 m)	0,0642	0,0677	10,79	22,09	1,1698	488,05	16,00	10,72	6,40	52,67
TAR 10 (0.5 m)	0,0917	0,0744	15,80	22,37	2,0925	633,08	18,61	11,90	3,54	45,48
TAR 10 (1 m)	0,1074	0,0827	21,87	22,47	3,3963	849,48	17,73	14,17	10,92	62,35
TAR 14 (0 m)	0,1920	0,0804	14,92	22,05	1,5506	615,06	23,40	11,48	7,22	40,15
TAR 14 (0.5 m)	0,0852	0,0672	16,68	22,21	2,3904	706,51	24,83	12,05	5,44	47,56
TAR 14 (1 m)	0,0540	0,0739	11,71	22,04	1,4249	552,66	17,16	12,95	5,34	114,13
TAR 18 (0 m)	0,0674	0,0662	11,57	22,39	1,3077	491,93	17,26	8,79	7,69	37,81
TAR 18 (0.5 m)	0,1231	0,0766	16,43	22,35	1,7852	694,05	21,78	11,23	8,40	42,60
TAR 18 (1 m)	0,0957	0,0898	17,84	22,18	2,4007	741,09	23,00	11,18	6,32	48,13
TAR 22 (0 m)	0,0540	0,0857	13,72	22,08	1,2725	544,12	18,35	11,21	7,34	30,88
TAR 22 (0.5 m)	0,0503	0,0807	12,50	22,27	1,9048	1033,88	37,60	12,21	11,32	40,03
TAR 22 (1 m)	0,0475	0,1162	15,77	22,48	2,0708	917,41	29,17	14,14	13,75	56,71
TAR 26 (0 m)	0,0673	0,0707	11,55	21,98	2,0067	671,13	24,60	12,51	25,76	60,35
TAR 26 (0.5 m)	0,0377	0,0554	10,61	22,46	1,3502	510,89	18,62	11,57	8,68	30,01
TAR 26 (1 m)	0,0833	0,0456	10,65	22,31	1,3668	518,24	19,95	9,50	6,12	33,20

Conclusioni

La procedura di estrazioni sequenziali impiegata ha permesso di studiare la mobilità dei metalli presenti nella coltre pelitica superficiale e di ottenere informazioni ulteriori per valutare la qualità dei sedimenti marini. Tale problema è stato particolarmente rilevante in un'area come quella in esame, interessata da arricchimenti significativi di alcuni elementi, ragionevolmente riconducibili alla presenza di sedimenti derivanti dallo smantellamento di rocce di origine vulcanica, come nel caso del Hg e dell'As.

Alla luce dei risultati ottenuti, il dragaggio delle sabbie relitte appartenenti al giacimento individuato al largo di Montalto di Castro (VT) e il loro utilizzo per il ripascimento della spiaggia di Tarquinia (VT) sono stati dichiarati ambientalmente compatibili. Le Amministrazioni hanno quindi potuto procedere all'esecuzione delle attività di dragaggio e di ripascimento, condotte tra la primavera e l'estate del 2004.

Il caso di studio presentato in questo lavoro ha portato, inoltre, alla modifica del protocollo di monitoraggio originario (Nicoletti et al., 2002; Paganelli et al., 2005).

In base ai risultati emergenti dalla caratterizzazione chimica della macroarea si possono aprire due percorsi metodologici differenti (Nicoletti et al., 2006):

- 1) i risultati della Fase B non evidenziano condizioni anomale di arricchimento nei sedimenti superficiali: nella fase di caratterizzazione dell'area di dragaggio (C1) è prevista la caratterizzazione chimica del solo sedimento superficiale mediante determinazione del contenuto totale;
- 2) nella Fase B le analisi chimiche individuano un arricchimento in alcuni elementi, la cui origine non può essere con certezza attribuita a condizioni naturali: la caratterizzazione dell'area di dragaggio (C1) dovrà essere articolata in una serie di indagini specifiche:
 - ? caratterizzazione chimica dei sedimenti del deposito sabbioso mediante determinazione del contenuto totale;
 - ? identificazione delle frazioni a diversa mobilità per gli elementi in traccia presenti nel sedimento superficiale pelitico dell'area di dragaggio, mediante estrazione sequenziale;
 - ? eventuale caratterizzazione chimica dei sedimenti di spiaggia mediante determinazione del contenuto totale per valutare la compatibilità chimica dei sedimenti del deposito sabbioso e della spiaggia da ripascere.

Note

- ¹⁾ Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152. "Norme in materia ambientale"
- ²⁾ Nel caso in cui vengano impiegati per il ripascimento materiali provenienti dall'escavo di fondali marini, la Regione, all'avvio dell'istruttoria per il rilascio dell'autorizzazione, deve acquisire il parere della Commissione Consultiva della Pesca ed informarne il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio.
- ³⁾ Tali interventi rientrano, infatti, nell'elenco delle tipologie progettuali dell'Allegato II della Dir. 85/377/CEE, in quanto interventi assimilabili a: "opere costiere destinate a combattere l'erosione e lavori marittimi volti a modificare la costa mediante la costruzione, per esempio, di dighe, moli, gettate ed altri lavori di difesa del mare, esclusa la manutenzione e la ricostruzione di tali opere" e all' "estrazione di minerali mediante dragaggio marino o fluviale".
- ⁴⁾ Decreto 6 novembre 2003, n. 367 "Regolamento concernente la fissazione di standard di qualità nell'ambiente acquatico per le sostanze pericolose, ai sensi dell'articolo 3, comma 4, del decreto legislativo 11 maggio 1999, n. 152".

Ringraziamenti

Le attività che hanno portato alla formulazione del Protocollo di Monitoraggio sono state condotte principalmente grazie ai finanziamenti della Regione Lazio, Assessorato Ambiente e Cooperazione fra i Popoli.

Bibliografia

- Anselmi B., Brondi A., Ferretti O. e Rabottino L. (1976) - *Studio mineralogico e sedimentologico della costa compresa fra Ansedonia e la foce del fiume Mignone*. Rendiconti, vol. XXXII (1): 311-348.
- APAT-ICRAM (2006) - *Manuale per la movimentazione di sedimenti marini*. Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare, 67 pp.
- Barghigiani C., Ristori T. e Lopez Arenas J. (1996) - *Mercury in marine sediment from a contaminated area of the northern Tyrrhenian Sea: <20 mm grain-size fraction and total sample analysis*. The Science of the Total Environment, 192: 63-73.
- Branca M.E., Calderoni G. e Petrone V. (1996) - *Geochimica dei sedimenti*. In: Il Mare del Lazio, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Regione Lazio, Assessorato Opere e Reti di Servizi e Mobilità: 109-135.
- Cosma B., Drago M., Piccazzo M. e Tucci S. (1994) - *Heavy metal in high Tyrrhenian Sea sediments: distribution of Cr, Cu, Ni, and Mn in superficial sediments*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat, 87: 145-161.
- Hitchcock D.R., Newell R.C. e Seiderer L.J. (1998) - *Investigation of Benthic and Surface Plumes associated with Marine Aggregate Mining in the United Kingdom – Final Report*. Contract Report for the U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service. Contract Number 14-35-0001-30763. Coastline Surveys Ltd Ref. 98-555-03 (Final).
- ICRAM (2001) - *Studio per l'impatto ambientale connesso allo sfruttamento di depositi sabbiosi sommersi lungo la piattaforma continentale laziale ai fini di ripascimento: SITO ANZIO AZ, Fase di caratterizzazione-C1*. ICRAM per la Regione Lazio.
- ICRAM (2002) - *Studio per l'impatto ambientale connesso allo sfruttamento di depositi sabbiosi sommersi lungo la piattaforma continentale laziale ai fini di ripascimento: Fase A – Caratterizzazione della piattaforma continentale laziale (Sintesi dei dati di letteratura scientifica e tecnica esistenti)*. ICRAM per la Regione Lazio.
- ICRAM (2004) - *Studio per l'impatto ambientale connesso allo sfruttamento di depositi sabbiosi sommersi lungo*

- la piattaforma continentale laziale ai fini di ripascimento: Montalto di Castro – Sito A2. Fase C1 - Caratterizzazione del sito.* ICRAM per la Regione Lazio.
- Kim E.H., Mason R.P., Porter E.T. e Soulen H.L. (2004) - *The effect of resuspension on the fate of total mercury and methyl mercury in a shallow estuarine ecosystem: a mesocosm study.* Marine Chemistry, 86: 121-137.
- Leoni L., Sartori F., Damiani V., Ferretti O. e Viel, D. (1991) - *Trace element distributions in superficial sediments of the Northern Tyrrhenian Sea: contribution to heavy-metal pollution assessment.* Environ. Geol. Water Sci., 17: 103-116.
- Leoni L., Sartori F. e Niccolai I. (1993) - *Metalli pesanti nei sedimenti attuali della piattaforma costiera toscana.* Atti Soc. Tosc. Sci. Nat, CII: 23-60.
- Locardi E. Funicello R., Lombardi G. e Parotto M. (1976) - *The main volcanic groups of Latium (Italy): relations between structural evolution and petrogenesis.* In: International Colloquium of Planetary Geology. Roma, September 22-30, 1975. Proceedings. Geologica Rom., 15: 279-300.
- Maggi C., Nonnis O., Paganelli D. e Gabellini M. (2004) - *Heavy metals in the latium continental shelf (Italy).* “Governare la Complessità con la Complessità”. VIII Congresso Nazionale di Chimica dell’Ambiente e dei Beni Culturali, Colle Val d’Elsa (Siena), 8-11 giugno 2004.
- Maggi C., Bianchi J., Dattolo M., Mariotti S., Cozzolino A. e Gabellini M. (2006) - *Fractionation studies and bioaccumulation of cadmium, mercury and lead in two harbour areas.* Chemical Speciation & Bioavailability, 18 (3): 95-103.
- Newell R.C., Seiderer L.J. e Hitchcock D.R. (1998) - *The impact of dredging works in coastal waters: a review of the sensitivity to disturbance and subsequent recovery of biological resources on the sea bed.* Oceanography and Marine Biology: an Annual Review. 36: 127-178.
- Nicoletti L., Paganelli D. e Gabellini M. (2006) - *Aspetti ambientali del dragaggio di sabbie relitte a fini di ripascimento: proposta di un protocollo di monitoraggio.* Quaderno ICRAM n. 5: 159 pp.
- Nicoletti L., La Valle P., Paganelli D. e Gabellini M. (2002) - *Il ripascimento mediante sabbie relitte: studi di compatibilità ambientale nell’esperienza laziale.* Atti del congresso Processi erosivi delle coste. Fenomeni di sedimentazione e trasporto: prevenzione e risanamento. Vieste, 30 novembre 2002: 48-53.
- Niccolai I., Ferretti O. e Manfredi Frattarelli F.M. (1993) - *Distribuzione degli elementi traccia nei sedimenti superficiali tra l’Isola d’Elba e l’Argentario, Arcipelago Toscano, Studio oceanografico, sedimentologico, geo-chimico e biologico.* Enea Area Energia Ambiente e Salute, S. Teresa (La Spezia): 185-195.
- Paganelli D., La Valle P., Maggi C., Nicoletti L., Nonnis O. e Gabellini M. (2005) - *Il ripascimento della spiaggia di Roma (Ostia): Studio di compatibilità ambientale per lo sfruttamento dei depositi sabbiosi sommersi.* Atti dei Convegni Lincei “Ecosistema Roma”, Roma 14-6 Aprile 2004, volume 218, Bardi Editore (2005).
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979) - *Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals.* Anal. Chem., 51: 844-851.

Ricevuto il 27/06/2007, accettato il 03/09/2007.

Le dighe marittime Progettazione, Realizzazione, Dissesti, Manutenzione

di Edoardo Benassai

Edito dall'Istituto Italiano per gli Studi Filosofici, Napoli, 2006.

L'incremento dei traffici marittimi e il continuo aumento delle dimensioni delle navi da trasporto, che si è verificato nella seconda metà del secolo scorso, ha indotto radicali trasformazioni nell'organizzazione dei porti. Inoltre, la realizzazione di nuove dighe marittime ha richiesto la soluzione di problemi complessi, l'uso di nuove tecnologie ed un continuo colloquio con altre discipline dell'ingegneria quali: Tecnica delle costruzioni, Meccanica dei fluidi e Geotecnica.

Il crescente e vivace interesse rivolto alle tematiche legate alla costruzione di nuove opere marittime sia da parte degli specialisti in questi temi di ricerca, sia di un pubblico di "tecnici", ha creato il presupposto per la stesura di un'opera d'insieme sulle dighe marittime non solo considerandone le diverse tipologie possibili ma anche analizzandone tutte le fasi, dalla progettazione alla manutenzione, dalla scelta dei materiali al dimensionamento, dalla bonifica dei fondali al monitoraggio. La scelta di dedicare quest'opera al solo tema delle dighe di difesa, argomento tra i più importanti delle Costruzioni Marittime, ha portato alla suddivisione del volume in quattro parti principali che insieme abbracciano tutte le fasi di intervento.

Nella prima parte, relativa ai dati di progetto, l'Autore tratta le principali tematiche proprie dell'Idraulica Marittima ponendo particolare attenzione alle implicazioni ingegneristiche, con riferimento alla descrizione ed alla rappresentazione prima delle onde regolari e poi di quelle irregolari generate dal vento, con particolare riguardo alla previsione del clima ondoso al largo, alla propagazione del moto ondoso sulle profondità decrescenti e all'analisi dell'interazione con le strutture marittime.



Nella seconda parte, molto approfondita, vengono analizzate le opere a scogliera o a gettata, trattando in ogni sua parte la fase di progettazione di questo tipo di opera dalla scelta dei materiali, al dimensionamento, alle problematiche di fondazione fino ai tipi di dissesto a cui sono soggette.

La terza parte del volume è dedicata alle opere a parete, anche queste trattate in dettaglio, spaziando dalla loro interazione con il moto ondoso alla qualità dei materiali per la messa in opera fino, anche in questo caso, a esempi di dissesto. Di particolare interesse è l'analisi dei tipi d'interventi e delle tecniche costruttive laddove le opere di nuova progettazione si distinguono da quelle esistenti sia perché, queste ultime hanno una storia tensionale e deformazionale pregressa, sia perché a volte sono state concepite e proporzionate secondo criteri diversi dagli attuali; in alcuni casi, poi, non si conoscono in dettaglio le caratteristiche dei terreni con i quali interagiscono, la geometria e i materiali con i quali sono costruite. Tale valutazione porta non di rado a dover prevedere interventi di miglioramento e di adeguamento che si rendono necessari per differenti ragioni, tra le quali sono comprese le modificazioni e l'invecchiamento che i materiali hanno subito nel tempo, l'introduzione di norme e regolamenti nuovi.

Infine, la quarta parte è dedicata ai modelli fisici necessari alla sperimentazione in laboratorio, fondamentale attività di supporto per la progettazione di opere complesse.

L'importante novità di quest'opera consiste proprio nella completezza della trattazione critica, oltre che dei temi generali, soprattutto delle varie componenti della diga marittima confrontando puntualmente le possibili soluzioni nei vari contesti. In questo senso può essere considerato un manuale utile non solo per lo studente che si affaccia alla progettazione di opere marittime ma anche per il progettista, il costruttore o l'ingegnere che cura la manutenzione e che ha un sempre maggiore bisogno di essere aggiornato sulla conoscenza dei fenomeni e sulle tecniche più innovative ed efficaci.

In quest'opera emerge con chiarezza l'esperienza professionale del Prof. Edoardo Benassai sia come docente universitario e come coordinatore di progetti di ricerca, sia come consulente in Italia e all'estero per la progettazione e realizzazione di opere marittime. Solo da queste esperienze poteva nascere un'opera di sintesi che non solo facesse luce sullo stato dell'arte delle dighe marittime, ma che fosse anche uno stimolo per una riflessione su questioni ancora aperte.

Pier Luigi Aminti

Norme per gli Autori

Studi costieri pubblica articoli scientifici originali in lingua italiana su argomenti relativi alla dinamica e difesa dei litorali ed alla gestione integrata della fascia costiera. Gli articoli scientifici sono sottoposti a revisione da parte di due esperti indicati dal Comitato scientifico.

Studi costieri pubblica anche Note tecniche e Riassunti di tesi di Laurea e di Dottorato di ricerca inerenti gli stessi temi. **Studi costieri** ospita inoltre rapporti sull'attività svolta da Amministrazioni pubbliche in materia di gestione integrata della fascia costiera. Questi ultimi due tipi di contributi sono soggetti solo ad una revisione di tipo redazionale.

Gli Autori degli articoli sono pregati di rispettare le seguenti norme. Gli articoli non redatti in piena conformità con esse non potranno essere presi in considerazione per la pubblicazione.

I manoscritti devono essere inviati in triplice copia con allegate figure e tabelle. Dopo l'accettazione deve essere inviata la copia definitiva su dischetto o per posta elettronica secondo le istruzioni riportate in seguito.

Titolo - Massimo 150 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

Titolo corrente - Massimo 80 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

Autore/i - Nome e Cognome per esteso, seguito da un numero in apice per indicare l'eventuale Istituto di appartenenza ed il relativo indirizzo.

Riassunto - Non più di 2.000 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

Parole chiave - Inserire 5 - 8 parole chiave, possibilmente non già comprese nel titolo.

Abstract - Riassunto, anche esteso, in lingua inglese di non più di 5.000 caratteri.

Key-words - In questo caso le parole chiave possono anche essere la traduzione di termini compresi nel titolo.

Stile - Adeguarsi allo stile dei lavori pubblicati su questo numero. Tutti i testi, compreso il titolo generale e quello dei paragrafi, devono essere scritti in Maiuscolo e minuscolo. Non inserire caratteri strani, di formato diverso o sottolineati. Il neretto è utilizzato solo per il titolo dei paragrafi. Eventuali sottoparagrafi possono portare un titolo in corsivo neretto. Non inserire righe bianche nel testo se non alla fine dei paragrafi e dei sottoparagrafi.

Evitare il più possibile i rientri e, comunque, farne di un solo ordine. Gli elenchi puntati sono identificati da -, 1) oppure a); ogni elemento dell'elenco è chiuso con ; salvo l'ultimo che chiude con un punto.

Formule - Se possibile utilizzare il formato testo; in alternativa l'editore di formule di Word impostando il carattere Garamond corpo 11 chiaro (copro 9 nero se le formule sono incluse in una didascalia di figure o di tabella). Utilizzare caratteri in neretto e corsivo solo se imposto dalla nomenclatura internazionale.

Tabelle - I caratteri alfabetici/numerici per le tabelle sono in stile Garamond corpo 11. Le Tabelle sono identificate con Tabella n, oppure (Tab. n) se fra parentesi. Devono essere precedute da una didascalia. Non inserire tabelle in forma di immagini.

Figure (fotografie, schemi, diagrammi) - Salvo accordi specifici con la Redazione, vengono pubblicate solo figure in bianco e nero. Le Figure sono identificate con Figura n, oppure (Fig. n) se fra parentesi. Tutte le figure devono avere una didascalia. La larghezza massima a stampa delle figure è 15 cm. Ad eccezione delle figure stampate a giustezza piena, tutte le altre non potranno avere una base superiore a 10 cm. La Redazione è a disposizione per discutere aspetti tecnici relativi a questo punto.

Note a piè di pagina - Sono da evitare il più possibile e, se lunghe o numerose, verranno riportate in corpo minore in fondo all'ultima pagina dell'articolo con richiami numerici nel testo. Indicazioni di Progetti e Finanziamenti verranno inserite prima della Bibliografia con gli eventuali Ringraziamenti.

Riferimenti bibliografici - Nell'articolo le citazioni sono racchiuse fra () con il seguente formato: (Verdi, 1990) o (Rossi e Verdi, 1989); (Verdi et al, 1987) qualora il numero degli Autori sia maggiore di due. Se citato nell'ambito di una frase il nome di un Autore (1995) è seguito dall'anno della pubblicazione a cui si fa riferimento.

Bibliografia - Tutti e solo i lavori citati nel testo devono comparire in Bibliografia. La Bibliografia deve essere in ordine alfabetico per cognome; es.:

Bianchi A., Rossi V. e Verdi T. (1999) - *Nuovi metodi di difesa dei litorali*. Studi costieri, 19: 153-157. (19 è il numero del fascicolo, 153-157 le pagine).

Neri A. e Rossi C. (1978) - *Elementi di geomorfologia costiera*. Nessuno Ed., Roma. pp.324.

Violi K. (1998) - *Il ripascimento dei litorali in Italia*. Atti XXI Congr. Soc. Ital. Geomorfologia. Bari. pp. 34-76.

Evitare di usare AA.VV., anche se il numero degli Autori è elevato.

Versione definitiva - Il file contenente la versione definitiva dell'articolo, in Word per Windows, deve essere inviato dopo la comunicazione di accettazione del manoscritto. Il testo non deve essere giustificato e, fatta eccezione per le formule scritte con l'editore specifico, può essere scritto con qualsiasi carattere.

Le didascalie delle figure (grafici e foto) dovranno essere inserite nel testo nel punto più opportuno.

Le figure dovranno essere inviate in file separati (.tif o .jpg a 300 DPI) e salvate con il nome del primo Autore seguito da Fig n (es. Rossi Fig 1.tif). Figure costituite da più parti devono essere montate dagli Autori in un file unico.

Altre informazioni - Nella preparazione degli articoli si tenga conto del fatto che una buona impaginazione necessita di un elevato rapporto testo/figure. Anche se gli Autori non devono procedere all'impaginazione dell'articolo, è bene che operino in modo tale da facilitare l'inserimento di ciascuna Figura dopo il rispettivo richiamo. Analogo discorso vale per le Tabelle.

Diritti d'autore - Nella lettera di accompagnamento del manoscritto gli autori, o anche uno solo di essi, devono dichiarare che quanto contenuto nell'articolo è di loro proprietà e che autorizzano l'Editore a pubblicare tutto il materiale da loro inviato. Nel caso di utilizzazione di figure tratte da altra pubblicazione gli Autori dovranno inviare l'autorizzazione alla stampa dell'Editore proprietario dei diritti. Analogamente deve essere fatto per riprese aeree e per la cartografia.

Il Direttore della collana si ritiene autorizzato ad utilizzare gli articoli per eventuali ristampe o per l'edizione di volumi tematici. Di ciò verrà comunque data notizia agli Autori.

Estratti: È prevista la stampa di 100 estratti per ciascun articolo. Agli Autori è richiesto un contributo di € 26 +IVA per pagina pubblicata sulla Rivista. Gli Autori sono pregati di inviare, insieme alle bozze corrette, le indicazioni necessarie per l'intestazione della nota di debito.

I manoscritti devono essere inviati alla

Redazione di Studi costieri
c/o Dipartimento di Scienze della Terra
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze
Tel. 055 2479241 - Fax 055 2479741
E-mail: epranzini@unifi.it

Segreteria del Comitato scientifico di Studi costieri
c/o Dipartimento di Ingegneria civile
Via Santa Marta, 4 - 50139 Firenze
Tel. 055 4796224 - Fax 055 495333
E-mail aminti@dicea.unifi.it