

# Studi costieri

Dinamica e difesa dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

N. 15  
2008



# 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 15

## Indice

<b>Presentazione dei documentari della serie Memorie del Clima Mediterraneo: Med Archives, T Med, A Boiling Sea</b> Sergio Silenzi, Saverio Devoti, Paolo Montagna, Luca Parlagreco, Marco Pisapia, Fabrizio Antonioli, Renato Chemello ed Enzo Pranzini	pag. 3-9
<b>La ricerca di nuovi archivi naturali ad alta risoluzione per comprendere le variazioni climatiche nel Mediterraneo nel corso degli ultimi 500 anni</b> Sergio Silenzi, Fabrizio Antonioli, Renato Chemello, Saverio Devoti, Claudio Mazzoli, Paolo Montagna	pag. 11-24
<b>Valutazione dell'idoneità di materiali flyschoidi derivanti da scavo in sotterraneo per interventi di ripascimento di spiagge ghiaiose</b> Carlo Cavallo, Andrea Cevasco, Marco Ferrari e Michele Piazza	pag. 25-37
<b>Il Catalogo delle opere di difesa costiera della Regione Emilia-Romagna</b> Luisa Perini, Samantha Lorito, Lorenzo Calabrese	pag. 39-56
<b>Prima risposta della spiaggia di Marina di Carrara ad un ripascimento artificiale non protetto</b> Serena Ferri, Filippo Pelliccia, Enzo Pranzini, Mariagrazia Rizzo e Giovanni Vitale	pag. 57-72
<b>Il Catalogo delle opere di difesa costiera della Regione Campania</b> Diego Vicinanza, Fiorella Galluccio, Italo Giulivo, Marco Tarantino	pag. 73-88
<b>Il colore della sabbia: percezione, caratterizzazione e compatibilità nel ripascimento artificiale delle spiagge</b> Enzo Pranzini	pag. 89-108
<b>Il colore della sabbia: indagine sul gradimento dei frequentatori di spiagge naturali e di spiagge oggetto di ripascimento artificiale</b> Enzo Pranzini, Daniela Simonetti e Giovanni Vitale	pag. 109-120
<b>Progetto sperimentale di iniezione d'acqua in unità geologiche profonde per il controllo della subsidenza costiera: il caso di studio di Lido Adriano (Ravenna)</b> Diego Vicinanza, Paolo Ciavola, Simona Biagi	pag. 121-138
<b>Recensioni</b>	
<b>Da Okeanos a "El Niño". Il contributo dell'oceanografia agli studi sul clima di Renzo Mosetti, Marina Silvestri</b> Mario Rigutti	pag. 139-140
<b>Norme per gli Autori</b>	pag. 141-142

Gruppo Nazionale per la  
Ricerca sull'Ambiente Costiero

ISSN 1129-8588



## Presentazione dei documentari della serie Memorie del Clima Mediterraneo: Med Archives, T Med, A Boiling Sea

Sergio Silenzi<sup>1</sup>, Saverio Devoti<sup>1</sup>, Paolo Montagna<sup>1</sup>, Luca Parlagreco<sup>1</sup>, Marco Pisapia<sup>1</sup>,  
Fabrizio Antonioli<sup>2</sup>, Renato Chemello<sup>3</sup> ed Enzo Pranzini<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – Roma.

<sup>2</sup>ENEA - Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Roma.

<sup>3</sup>Dipartimento di Ecologia, Università di Palermo, Palermo.

<sup>4</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, Firenze.

### Riassunto

In questa breve nota sono presentate le sinossi dei tre documentari scientifici realizzati dall'ISPRA (già ICRAM) ed allegati alla rivista.

Nel primo documentario viene illustrato il percorso scientifico che ha portato alla calibrazione di un nuovo archivio naturale, validato per la ricostruzione delle variazioni delle temperature superficiali del Mare Mediterraneo durante gli ultimi 150 anni: il corallo non-tropicale *Cladocora caespitosa*. Il secondo documentario illustra l'ecologia e la capacità di registrare le variazioni del livello del mare e delle temperature delle acque superficiali del gasteropode gregario *Dendropoma petraeum*, costruttore dei cosiddetti *reef* a vermeti. Nello scheletro aragonitico di questo organismo sono contenuti 500 anni di storia del Mar Mediterraneo.

Il terzo documentario fornisce indicazioni sui possibili scenari climatici futuri e sugli effetti che questi avranno sugli ecosistemi terrestri sia mediterranei che globali, con particolare riferimento a quello marino costiero. Infine, presenta le ipotesi e le tecniche possibili per la prevenzione dei disastri naturali, parlando degli adattamenti e delle mitigazioni necessarie a preservare la qualità degli ambienti del nostro pianeta.

Per ogni filmato sono forniti e brevemente discussi i principali riferimenti bibliografici che sono stati consultati per la stesura dei testi e delle animazioni.

**Parole chiave:** documentari scientifici, archivi naturali, variazioni del clima e del livello del mare, ultimi 500 anni, futuro, Mare Mediterraneo.

### Introduzione

Lo scopo di questa breve nota è quello di introdurre i documentari inseriti nel DVD allegato alla rivista, fornendo alcuni dei principali riferimenti agli studi scientifici che ne formano il contenuto. Ciò per ovviare al fatto che, molto spesso, la diffusione delle informazioni relative alle variazioni climatiche non è accompagnata da dati che consentano di verificare se quanto detto è frutto di ricerche i cui risultati siano condivisi dalla comunità scientifica. Basti pensare alle dichiarazioni apparse sulla stampa nell'ambito della Conferenza Nazionale sul Clima del settembre 2007 ed organizzata dal Ministero dell'Ambiente: in quella sede si riporta che i chilometri di costa in erosione in Italia sono più di 5000 e che, da qui a pochi anni, il Mare Adriatico si trasformerà in una *palude sabmastra*, cioè in una distesa di acqua bassa. Come appare dai dati pubblicati nel n. 10 di Studi Costieri (2006), i km di costa nazionale in erosione sono circa 1600, com'è altrettanto

noto che il riscaldamento globale renderà il Mare Adriatico più profondo di qualche decimetro. Lo scopo dei filmati sul clima, allegati al presente numero di Studi Costieri, è quello di fornire una visione delle ricerche e dei risultati conseguiti nell'ambito di alcuni studi paleoclimatici e delle prospettive future che attendono il Mediterraneo, facendo anche riferimento all'attività di ricerca svolta dagli Autori. Questi strumenti filmati, seppur finalizzati alla divulgazione, si rivolgono anche a quei ricercatori che operano in settori disciplinari affini, con la speranza che vi trovino elementi utili alla loro attività. La materia trattata è soggetta ad una continua evoluzione e quanto affermato in alcune parti dei filmati non trova ancora l'accordo di una parte, seppur minoritaria, della comunità scientifica. E' per questo che i filmati sono stati referti da un "garante" indipendente, scelto dalla rivista, e che ha verificato che quanto espresso trovi conferma nella letteratura scientifica, indipendentemente dalla propria opinione in merito.

Un'operazione analoga venne condotta quando fu pubblicato da ICRAM il documentario scientifico "Tempo Instabile sul Quaternario", la cui sceneggiatura venne poi pubblicata nella rivista Geo-Archeologia dopo attenta valutazione esterna (Silenzi et al., 2004a).

I testi sono stati realizzati in inglese (lingua originale), italiano e spagnolo. Nella versione allegata alla rivista, appositamente studiata per un rapido accesso a tutti e tre i film da un unico supporto DVD, è stata inserita la sola versione italiana.

Sono di seguito riassunte le sinossi dei documentari e le principali fonti bibliografiche consultate per scrivere i testi dei diversi video; in questo stesso volume della Rivista è proposta una *review* dedicata agli archivi climatici naturali, oggetto dei primi due documentari (Med Archives e T Med) a cui si rimanda il lettore per una più approfondita analisi della tematica (Silenzi et al., 2008; questo numero).

Pur nella consapevolezza che i documentari non possono esaurire tutti gli aspetti degli argomenti trattati, gli autori sperano di aver dato un piccolo contributo alla diffusione dei risultati di una ricerca che li pone costantemente davanti a nuovi e affascinanti problemi, sia quando hanno la fortuna di svolgere le proprie ricerche negli angoli più remoti della Terra, sia quando si recano a studiare in località poste a pochi chilometri dalle proprie scrivanie. La speranza è che coloro che vedranno i filmati possano acquisire quegli elementi di lettura del paesaggio costiero che consentano loro di provare, davanti ad un *reef* a vermetidi o ad un solco di battente, lo stesso entusiasmo che ci ha mosso a produrre questi documentari.

### Film 1 - Med Archives

Nel Mar Mediterraneo, dove mancano i *reef* corallini che costituiscono gli indicatori (*proxy*) utilizzati alle latitudini tropicali e subtropicali per ricostruire le variazioni del livello del mare (SL; *sea-level*) e della temperatura superficiale dell'acqua (SST; *sea surface temperature*), la possibilità di ricavare questi parametri si basa sulle serie temporali di dati storici. Queste ultime coprono, spesso con grande margine di errore, solo alcuni settori del Mar Mediterraneo, in modo discontinuo e difficilmente parametrizzabile.

Dati presi nell'ambito di crociere oceanografiche scientifiche ed a bordo di navi militari sono disponibili solo per gli ultimi decenni. Anche i dati satellitari, seppure di grande affidabilità e dettaglio, vengono registrati solo a partire dall'inizio degli anni '90. L'impiego di calibrazioni con dati puntiformi attraverso la *Optimum Interpolation* (Reynolds e Smith, 1994) permette di estendere le serie storiche satellitari sino alla metà del XIX secolo: tali dati sono però delle ricostruzioni, e sono pertanto affetti da grande incertezza a causa della difficoltà di calibrazione e d'interpolazione di punti fra loro distanti. Se ciò è vero a livello globale, ancor più lo è nel Mediterraneo, dove la composizione delle correnti ed i rapporti fra i singoli mari o bacini rende il modello di distribuzione delle masse d'acqua superficiali piuttosto complesso e di difficile interpretazione.

Sino a pochi anni fa gli studi paleoclimatici nel Mediterraneo venivano realizzati utilizzando

indicatori quali i foraminiferi (per es. Kallel et al., 1997), i dinoflagellati (cisti), il nanoplankton calcareo (per es. Sangiorgi et al., 2002), l'applicazione degli alkenoni (per es. Sicre et al., 1999) e i concrescimenti di serpulidi su speleotemi sommersi (Antonioli et al., 2001, 2004).

Questi archivi naturali, seppure affidabili e con un'ottima riproducibilità del dato, risentono della mancanza di dettaglio e di una risoluzione insufficiente per gli ultimi secoli: è proprio questo tipo di risoluzione che è, invece, necessaria per utilizzare la variabilità climatica del passato al fine di calibrare modelli ed elaborare scenari di previsione futura affidabili (cioè che forniscano previsioni attendibili), oltre che a descrivere l'influenza antropica sul bacino e le interconnessioni fra il Mediterraneo e il resto dell'emisfero boreale (ad es. con l'indice NAO, *North Atlantic Oscillation*). Tenendo conto delle necessità scientifiche sopra elencate, un gruppo di paleoclimatologi guidato dall'ICRAM (ora ISPRA), ha pensato per la prima volta di importare le esperienze geochimiche conseguite studiando i reef corallini dei mari tropicali ai coralli del Mar Mediterraneo.

I coralli sono, infatti, termometri di sorprendente precisione: i rapporti fra elementi chimici che ne formano lo scheletro spesso non sono casuali, ma seguono la temperatura che ha il mare durante la crescita (per es. Beck et al., 1992). Di anno in anno nuove bande si aggiungono allo scheletro del corallo, coprendo alcuni secoli di storia come nei *Porites*, tipici dell'Oceano Indiano e Pacifico (per es. McCulloch et al., 1994).

Il film ricostruisce il percorso affrontato nei lavori di Silenzi et al. (2005) e Montagna et al. (2007), che hanno portato alla calibrazione di curve termodinamiche capaci di correlare alcuni rapporti fra elementi in traccia analizzati nello scheletro corallino (tipicamente Sr/Ca, B/Ca, Mg/Ca, Li/Ca) con le temperature dell'acqua in cui cresceva il corallo, in un nuovo e sorprendente archivio climatico: il madreporario *Cladocora caespitosa*.

L'intervallo temporale ricostruibile con questo corallo permette di disegnare le SST del Mediterraneo centrale durante gli ultimi 150 anni circa, con una risoluzione bisettimanale.

## Film 2 - T Med

I gas serra, negli ultimi 800 mila anni, hanno subito cambiamenti sostanziali correlati all'alternarsi dei cicli glaciali ed interglaciali (per es. Petit et al., 2008; Lüthi et al., 2008). Per comprendere come l'aumento di CO<sub>2</sub> modificherà il clima del futuro, gli scienziati si servono di simulazioni matematiche. Questi modelli hanno però bisogno di essere tarati: viene simulato il passato e comparato con quanto realmente avvenuto.

Partendo dal lavoro di Antonioli et al. (1999), un gruppo di studio internazionale (alla stesura della presente nota partecipa solo una parte dei ricercatori attivi in tal senso) si è applicato allo studio dei reef a vermeti della Sicilia come potenziale archivio paleoclimatico. I reef a vermeti mediterranei sono principalmente costituiti dal gasteropode sessile *Dendropoma petraeum*. Peculiarità di questo gasteropode termofilo è quella di formare dei veri e propri reef nella parte inferiore dell'intervallo di marea.

Ciò, oltre ad aver permesso ai diversi autori l'utilizzo dei vermeti come proxy neotettonico (Antonioli et al., 1999 e bibliografia in esso contenuta) ha consentito, attraverso la datazione di porzioni fossili in continuità stratigrafica, di impiegare i reef viventi per determinare le variazioni del SL negli ultimi 550 anni circa (Antonioli et al., 2002).

L'applicazione delle tecniche di analisi degli isotopi stabili dell'ossigeno, effettuate sulle stesse colonie utilizzate in Sicilia da Antonioli et al. (2002), ha permesso a Silenzi et al. (2004b) di dimostrare la potenzialità del *D. petraeum* come archivio delle variazioni delle SST. Le ricerche effettuate hanno reso possibile identificare, nel settore del Mare Tirreno Meridionale, la registrazione della Piccola Età Glaciale, periodo freddo occorso fra il XVII e XIX secolo.

Il documentario spiega l'ecologia dei reef, le tecniche analitiche utilizzate ed i principali risultati scientifici ottenuti da queste ricerche.

### Film 3 - A Boiling sea

Nell'ultimo secolo la temperatura globale è aumentata di 0.7°C. Nei prossimi 100 anni, a seconda di quanto gas serra l'uomo immetterà nell'atmosfera, le previsioni ipotizzano un ulteriore riscaldamento, compreso fra 1.1 ed oltre 6°C.

L'intera coltre glaciale della Groenlandia potrebbe scomparire ed il livello globale dei mari si innalzerebbe, in conseguenza di ciò, di oltre 6 metri. Si tornerebbe così al paesaggio di 125 mila anni fa.

Il film compie un viaggio fra i continenti e gli oceani del pianeta per spiegare i meccanismi del cambio climatico, le conseguenze e le possibili soluzioni. Il testo si basa principalmente sui risultati del Rapporto Stern (2006) e su quelli dell'IPCC (2001, 2007).

Le conclusioni cui arrivano questi studi (per es. su temperature e livello del mare nel futuro; Fig. 1) sono oggetto di discussione all'interno della comunità scientifica, anche perchè altre previsioni forniscono sia scenari più catastrofici che assai più rassicuranti (ad esempio, per le previsioni sul livello marino è particolarmente rappresentativa la frase "...the model is what it says a model, nothing more" di N.A. Mörner); lo stesso autore afferma (Mörner, 2004) che una stima appropriata del futuro sollevamento del livello marino, considerando il passato geologico, può essere individuata in  $+5 \pm 15$  cm per il 2100.

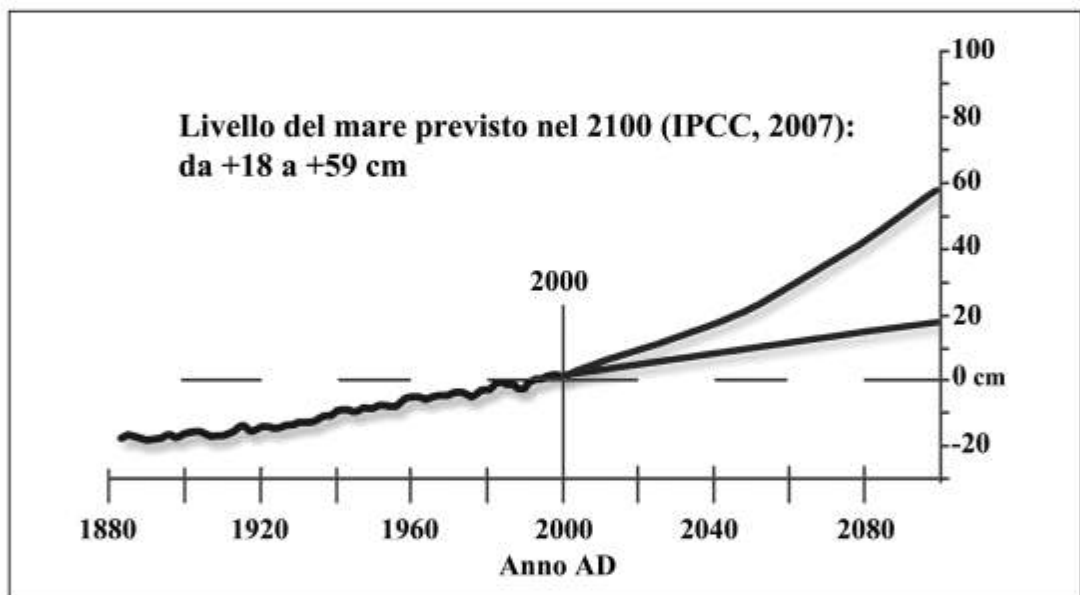


Figura 1 - Temperature e livello del mare nel futuro.

Altri autori considerano che il contributo che lo scioglimento della coltre glaciale darà al sollevamento marino sia in realtà sottostimato dall'IPCC: ad esempio, attraverso l'applicazione di un semplice modello statistico, Rahmstorf (2007) stima che il mare si solleverà nel 2100 da 0.5 a 1.4 m rispetto al livello del 1990. Cosa accadrà veramente?

Ancora molta strada deve essere fatta dalla Ricerca per capire le dinamiche del pianeta su cui viviamo, ed è anche per questo che molti, sia fra i pessimisti che tra gli ottimisti, consigliano di agire secondo un Principio di Precauzione così come espresso dalla convenzione quadro sui mutamenti climatici: la mancanza di complete certezze sugli accadimenti futuri non deve essere usata per posporre l'azione di mitigazione ed adattamento. In altre parole, le previsioni degli scenari pessimistici, per quanto incerte, possono comunque essere considerate nelle attività di gestione dell'ambiente dei governi e dei singoli.



Nell'ambito del video sono evidenziate alcune applicazioni nel campo della gestione della fascia costiera e della valutazione del Rischio, nonché alcune tra le più accreditate ipotesi per il sequestro della CO<sub>2</sub> (Schrag, 2007; Friedmann, 2007). Le ricerche relative alla fascia costiera sono attualmente oggetto di alcuni progetti nazionali (per es. VECTOR) ed europei (per es. MedPlan in Beachmend-e) e che vedono sempre gli Autori parte attiva negli studi. La valutazione dei rischi, i possibili adattamenti e le mitigazioni attuabili sono riferite, oltre che ai citati rapporti IPCC e Stern, a tutti i diversi articoli del Volume 6 (Silenzi et al., 2003 a e b; Devoti et al., 2003 a e b; Nisi et al., 2003 a e b) e del Volume 10 di Studi Costieri (GNRAC, 2006), nonché a Luterbacher et al. (2006), Collins et al. (2007) e Perucci (2007).

### Ringraziamenti

I documentari sono stati prodotti dall'Icram (ora ISPRA) grazie al supporto della Fondazione Ermenegildo Zegna e dei Progetti Vector e Micena. Molti ricercatori di tutto il mondo, oltre agli autori, hanno contribuito a realizzare i video, concedendo interviste e riprese in occasione di convegni o durante attività di laboratorio congiunte. Fra questi ringraziamo particolarmente: F. Andaloro (Italia), J.P. Gattuso (Francia), J. Luterbacher (Svizzera), C. Mazzoli (Italia), M. McCulloch (Australia).

Un particolare e sentito ringraziamento va al Referee dei video, Giuseppe Mastronuzzi.

Le riprese sono state effettuate in Antartide, Australia, Canada, Malesia e Borneo, Cile e Isola di Pasqua, Cina e Hong Kong, Francia, Giappone, Indonesia, Inghilterra, Italia, Islanda, Kenya, Namibia, Messico, Papua Nuova Guinea, Stati Uniti, Sud Africa, Svizzera. Specifici *credits* sono riportati alla fine dei video.

### Bibliografia

- Antonioli F., Chemello R., Improta S. e Riggio S. (1999) - *Dendropoma lower intertidal reef formations and their palaeoclimatological significance, NW Sicily*. Marine Geology, 161: 155-170.
- Antonio F., Silenzi S. e Frisia S. (2001) - *Tyrrhenian Holocene palaeoclimate trends from spelean serpulids*. Quaternary Science Reviews, 20: 1661-1670.
- Antonioli F., Cremona G., Immordino F., Puglisi C., Romagnoli C., Silenzi S., Valpreda E. e Verrubbi V. (2002) - *New data on the Holocene sea level rise in NW Sicily (Central Mediterranean Sea)*. Global and Planetary Change, 34: 121-140.
- Antonioli F., Bard E., Potter E.K., Silenzi S. e Improta S. (2004) - *215-ka history of sea-level oscillations from marine and continental layers in Argentarola Cave speleothems (Italy)*. Global and Planetary Change, 43: 57-78.
- Aucelli P.P.C., Aminti P.L., Amore C., Artom C., Bellotti P., Bozzano A., Caputo C., Castellini G., Cipriani L.E., Cocco E., Corradi N., D'Alessandro L., Damiani L., Davoli L., De Pippo T., Devoti S., Di Gregorio F., Evangelista S., Ferrari M., Ferri S., Fierro G., Fontolan G., Ginesu S., Giuffrida E., Iannantuono E., Iuliano S., La Monica G.B., Landini B., Mascioli F., Nesci O., Palmentola G., Pranzini E., Pugliese F., Randazzo G., Raffi R., Roskopf C.M., Salvatore M.C., Silenzi S., Simeoni U. e Veltri P. (2006) - *Lo stato dei litorali italiani*. Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero. Studi Costieri, 10: 5-112.
- Beck J.W., Edwards R.L., Ito E., Taylor F.W., Recy J., Rougerie F., Joannot P., Henin C. (1992) - *Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios*. Science, 257: 644-647.
- Collins W., Colman R., Haywood J., Manning M.R. e Mote P. (2007) - *La fisica del cambiamento climatico*. Le Scienze, 472: 74-83.
- Devoti S., Gabellini M., Nisi M.F., Silenzi S. (2003a) - *La valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici sulle coste: rassegna delle principali metodologie di analisi adottate in ambito nazionale ed internazionale*. Studi Costieri, 6: 57-72.

- Devoti S., Nisi M.F., Silenzi S. (2003b) - *Caratteri geologici, ed evoluzione paleogeografica della pianura versiliese*. Studi Costieri, 6: 73-89.
- Friedmann S.J. (2007) - *Geological Carbon Dioxide Sequestration*. Elements, 3: 179-184.
- IPCC (2001) - *WGI Third Assessment Report. Summary for Policymakers, Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginevra, 13-16 Febbraio 2001.
- IPCC (2007) - *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment.
- Kallel N., Paterne M., Labeyrie L., Duplessy J.C. e Arnold M. (1997) - *Temperature and salinity records of the Tyrrhenian Sea during the last 18,000 years*. Paleogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology 135: 97-108.
- Luterbacher J., Xoplaki E., Castyl C., Wanner H., Pauling A., Küttel M., Rutishauser T., Brönnimann S., Fischer E., Fleitmann D., González-Rouco F. J., García-Herrera R., Barriendos M., Rodrigo F., Gonzalez-Hidalgo J. C., Saz M. A., Gimeno L., Ribera P., Brunet M., Paeth H., Rambu N., Felis T., Jacobeit J., Dünkeloh A., Zorita E., Guiot J., Türkeş M., Alcoforado M. J., Trigo R., Wheeler D., Tett S., Mann M. E., Touchan R., Shindell D. T., Silenzi S., Montagna P., Camuffo D., Mariotti A., Nanni T., Brunetti M., Maugeri M., Zerefos C., De Zolt S., Lionello P., Nunes MF., Rath V., Beltrami H., Garnier E., Le Roy Ladurie E. (2006) - *Mediterranean Climate Variability Over The Last Centuries: A Review*. In: *The Mediterranean Climate: an overview of the main characteristics and issues*. Ed. P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli, e R. Boscolo, Elsevier Science, Amsterdam, the Netherlands, pp. 27-148.
- Lüthi D., Le Floch M., Bereiter B., Blunier T., Barnola J.-M., Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H., Kawamura K. e Stocker F. T. (2008) - *High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present*. Nature, 453: 379-382.
- McCulloch, M.T., Gagan, M.K., Mortimer, G.E., Chivas, A.R. e Isdale, P.J., 1994. *A high-resolution Sr/Ca and 18O coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982-1983 El Niño*. Geochimica et Cosmochimica Acta 58: 2747-2754.
- Montagna, P., McCulloch, M., Mazzoli, C., Silenzi, S. and Odorico, R. (2007) - *The non-tropical coral Cladocora caespitosa as the new climate archive for the Mediterranean Sea: high-resolution (-weekly) trace element systematics*. Quaternary Science Review, 26: 441-462.
- Mörner N.A. (2004) - *Estimating future sea level changes from past records*. Global and Planetary Change, 40: 49-54.
- Nisi M.F., Devoti S., Gabellini M., Silenzi S., Puglisi C. e Verrubbi V. (2003a) - *Acquisizione di dati territoriali per la valutazione del Rischio da risalita del livello del mare in Versilia*. Studi Costieri, 6: 91-131.
- Nisi M.F., Aminti P., Cipriani L., De Donatis M., Devoti S., Gabellini M., Gallerini G., Pranzini E., Rossi L. e Silenzi S. (2003b) - *La valutazione del Rischio da RSLR in Versilia*. Studi Costieri, 6: 133-162.
- Perucci C. (2007) - *Salute umana*. Presentazione al convegno "Dal globale al locale. Piani di azione per il clima", Ferrara il 10 e 11 maggio 2007. [http://www.arpa.emr.it/dettaglio\\_documento.asp?id=594&idlivello=216](http://www.arpa.emr.it/dettaglio_documento.asp?id=594&idlivello=216)
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis J., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E. e Stievenard M. (1999) - *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica*. Nature, 399: 429-436.
- Reynolds R.W. e Smith T.M., (1994) - *Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation*. Journal of Climate 7: 929-948.
- Rahmstorf S. (2007) - *A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise*. Science 315: 368-370.
- Sangiorgi F., Capotondi L. e Brinkhuis H. (2002) - *A centennial scale organic-walled dinoflagellate cyst record of the last deglaciation in the South Adriatic Sea (Central Mediterranean)*. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 186: 199-216.

- Schrag D.P. (2007) - *Confronting the climate-energy challenge*. Elements, 3: 171-178.
- Sicre M.-A., Ternois Y., Miquel J.-C. e Marty J.-C. (1999) - *Alkenones in the northwestern Mediterranean sea: interannual variability and vertical transfer*. Geophysical Research Letters, 26: 1735-1738.
- Silenzi S., Devoti S., Nisi M.F. (2003a) - *La valutazione del rischio da risalita relativa del livello del mare (RSLR) nelle Pianure Costiere. Aspetti concettuali ed ipotesi di Linee Guida*. Studi Costieri, 6: 5-30.
- Silenzi S., Devoti S., Nisi M.F. e Antonioli F. (2003b) - *Le variazioni del livello del mare come Cause Determinanti il Rischio da RSLR*. Studi Costieri, 6: 31-56.
- Silenzi S., Devoti S., Gabellini M., Magaletti E., Nisi M.F., Pisapia M., Angelelli F., Antonioli F. e Zarrattini A. (2004a) - *Le variazioni del clima nel Quaternario*. Geo-Archeologia, 1: 15-50.
- Silenzi S., Antonioli F. e Chemello R. (2004b) - *A new marker for sea surface temperature trend during the last centuries in temperate areas: vermetid reef*. Global and Planetary Change, 40/1-2: 105-114.
- Silenzi S., Bard E., Montagna P. e Antonioli F. (2005) - *Isotopic and elemental records in a non-tropical coral (Cladocora caespitosa): Discovery of a new high-resolution climate archive for the Mediterranean Sea*. Global and Planetary Change, 49: 94-120.
- Silenzi S., Devoti S., Montagna P., Antonioli F. e Chemello R. (2008) - *Nuovi archivi naturali ad alta risoluzione per comprendere le variazioni climatiche nel corso degli ultimi 500 anni*. Studi Costieri, questo volume.
- Stern N. (2006) - *Stern Review: The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press, 579 pp. <http://www.hm-treasury.gov.uk/>

**Manoscritto ricevuto il 13/09/2008, accettato il 3/11/2008.**



## La ricerca di nuovi archivi naturali ad alta risoluzione per comprendere le variazioni climatiche nel Mediterraneo nel corso degli ultimi 500 anni

Sergio Silenzi<sup>1</sup>, Fabrizio Antonioli<sup>2</sup>, Renato Chemello<sup>3</sup>, Saverio Devoti<sup>1</sup>,  
Claudio Mazzoli<sup>4</sup>, Paolo Montagna<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ISPR - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.

<sup>2</sup> ENEA - Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Roma.

<sup>3</sup> Dipartimento di Ecologia, Università di Palermo, Palermo.

<sup>4</sup> Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, Padova.

### Riassunto

Al fine di comprendere la variabilità climatica del passato, per capire i meccanismi climatici in atto, supportare la calibrazione dei modelli di previsione e pianificare gli eventuali adattamenti necessari al clima del futuro, è necessario disporre di serie storiche di dati paleoclimatici. Sono questi dati, infatti, che possono permettere di chiarire i meccanismi del cambio climatico in termini di variazioni naturali a carattere planetario e locale, le interazioni fra oceani, terre emerse ed atmosfera, nonché i rapporti fra aree climatiche della Terra. Inoltre, comprendere come le variazioni attuali si discostino da quelle naturali è essenziale per capire quanto l'uomo ha modificato il clima del recente passato e, quindi, quanto influirà sul futuro. Nel Mare Mediterraneo, a causa della mancanza dei reef corallini, la ricostruzione delle variazioni del livello marino e delle temperature delle acque superficiali si basa quasi esclusivamente sui dati strumentali, provenienti da mareografi, dati satellitari e da campagne oceanografiche. Questi coprono al più pochi decenni (satelliti) o l'ultimo secolo (mareografi).

Al fine di estendere i dati disponibili quanto più indietro nel passato, mantenendo però un'alta risoluzione temporale, negli ultimi anni sono stati studiati, fra gli altri, due nuovi archivi climatici marini: i) il mollusco *Dendropoma petraeum*, che registra le temperature ed il livello del mare degli ultimi 500 anni; ii) il corallo *Cladocora caespitosa*, che registra le temperature degli ultimi 100 anni.

In questo lavoro sono descritte le principali caratteristiche ecologiche di questi nuovi archivi naturali, l'approccio metodologico utilizzato per comprenderne le potenzialità e i principali risultati ottenuti in termini di ricostruzione del livello e delle temperature marine.

**Parole chiave:** variazioni del livello del mare, variazioni della temperatura superficiale del mare, Olocene recente, archivi naturali, Mediterraneo.

### Abstract

*Paleoclimate records are important tools for understanding climate modifications and describing recent anthropogenic perturbations in climate change relative to natural variability in the Earth climate system. Moreover, time-series proxy records of the main physical and chemical parameters in the marine and continental environments are increasingly used for testing climate models in order to ascertain the reliability of projections of future scenarios in our greenhouse modified Earth.*

*In order to make up for the limited number of continuous instrumental measurements back in time of climatic variables such as sea surface temperature (SST), and sea-level fluctuations, a complementary approach is the examination of geochemical tracers (i.e. trace elements and stable isotopes) in well-dated natural marine archives. Recently, the Mediterranean Sea has been the focus of a number of studies where new high resolution climate archives have been investigated utilizing proxies for sea surface temperature, different to those available for tropical regions. In particular, vermetids (*Dendropoma petraeum*) and non-tropical zooxanthellate corals (*Cladocora caespitosa*) have been studied by conventional and advanced analytical techniques (e.g., laser ablation ICP-MS, MC-ICP-MS) and have been successfully used as high-resolution palaeo-environmental proxies. Vermetid reefs have the potential to yield valuable information on the past sea-level changes and SST during the last 500 years, through the combination of stable isotopes and radiocarbon dating. The trace element concentration of the skeletal aragonite of the Mediterranean zooxanthellate coral *Cladocora caespitosa* has been successfully demonstrated to be a valid high-resolution SST archive for the last 150 years. Here we present a review of the main results we have obtained during the last six years in the study of natural marine archives collected in various sites along the Mediterranean Sea, reporting our methodological approach and the most important achievements.*

**Keywords:** sea-level, sea surface temperature, natural archives, last centuries, Mediterranean Sea.

### **Il significato delle ricerche sui nuovi archivi climatici per il Mare Mediterraneo**

Uno dei principali obiettivi degli studi climatici è quello di riuscire a discriminare il rapporto fra cambiamenti naturali ed antropogenici, nonché formulare scenari di previsione futura attendibili (Schneider, 2006).

Ad esempio, i modelli di circolazione generale (General Circulation Models - GCMs) forniscono un'adeguata descrizione della variabilità climatica di corto periodo e permettono di comprendere le interazioni fra atmosfera, oceano, litosfera e biosfera (Duffy et al., 2003; Govindasamy et al., 2003; Palmer et al., 2005). Nonostante ciò, per rendere funzionanti tali modelli è necessario applicare delle semplificazioni: queste fanno sì che, spesso, gli scenari che ne scaturiscono sono equivalentemente possibili ma contrastanti fra loro (Broecker, 2001; Bradley et al., 2003; Bengtsson et al., 2006; Hunt, 2006).

Vista la difficoltà dei modelli di descrivere scenari certi, molti ricercatori ancora disquisiscono se siamo all'inizio di un riscaldamento mai ravvisato sulla Terra per velocità ed intensità o, al contrario, se ci troviamo prossimi alla soglia di una nuova era glaciale. Altri quesiti che si pone la comunità scientifica riguardano la velocità della desertificazione, se il livello del mare subirà veramente un'ulteriore accelerazione nella risalita e in che tempo gli effetti si registreranno a scala globale, come si modificheranno i monsoni e l'occorrenza dei El Niño e La Niña, e cosa succederà se la circolazione oceanica globale si interromperà (vale la pena ricordare che ancora molti fra gli addetti ai lavori pensano che il riscaldamento dell'Europa occidentale sia dovuto solo all'effetto della Corrente del Golfo, che invece contribuisce in minima parte; Seager et al., 2002).

Per riuscire a ridurre i margini d'incertezza dei GCMs e tentare di comprendere sia i meccanismi di retroazione sia quelli di teleconnessione fra i vari sistemi climatici planetari, bisogna calibrare i modelli e renderli capaci di effettuare delle simulazioni di lungo periodo e ad alta risoluzione. Per effettuare tali calibrazioni si usa generalmente verificare la risposta dei modelli al clima del recente passato, esprimendo conseguentemente le variazioni future in termini di differenze con il periodo di confronto.

La ricostruzione del passato si basa sull'utilizzo dei record strumentali disponibili; questi, però, sono in grado di coprire solo poche decadi con un numero ridotto di dati, spesso acquisiti in modo discontinuo. Per sopperire a tale mancanza possono essere utilizzati dati paleoambientali e paleoclimatici dedotti dallo studio di archivi naturali quali anelli degli alberi, carote di ghiaccio,

associazioni polliniche, organismi marini e resti ossei o denti di organismi continentali, speleotemi, ecc. Ciò può consentire di estendere indietro nel tempo i periodi di verifica dei modelli ed ottenere scenari predittivi di più lungo intervallo o, quantomeno, di ricostruire le dinamiche climatiche occorse nel passato.

Proprio per comprendere i meccanismi di variabilità ambientale e poter disporre di una base di dati utile a calibrare sul lungo periodo i modelli e gli scenari di previsione futura, alcuni degli autori del presente lavoro, in collaborazione con colleghi di istituzioni scientifiche straniere, negli ultimi anni hanno lavorato all'identificazione di nuovi archivi climatici adatti a descrivere tali variazioni nell'ambito dell'area mediterranea (Tab.1). Questo lavoro è stato impostato per coprire diversi archi temporali (dalle migliaia alle decine di anni) con risoluzioni adeguate alle scale di volta in volta analizzate (dalle centinaia di anni alle settimane).

L'importanza di comprendere cosa avviene nel Mediterraneo risiede nel fatto che questo mare, con le sue peculiarità di bacino semi-chiuso e la sua posizione sul pianeta alle medie latitudini, è particolarmente sensibile ai cambiamenti climatici, come testimoniato nella sua storia geologica anche recente (Taviani, 2002; Somot et al., 2006).

**Tabella 1 - Gli archivi climatici presentati nei documentari T-Med e Med Archives e le relative informazioni paleoclimatiche in essi contenute.**

Archivio naturale	Ambiente	Periodo di tempo ricostruibile (colonie viventi)	Risoluzione temporale	Parametri ambientali ricavabili	Principali riferimenti
Reef a vermeti ( <i>Dendropoma petraeum</i> )	mesolitorale inferiore/frangia infralitorale superiore in acque calde	1400 AD - presente	30-40 anni	Livello del mare; SST	Antonioli et al., 1999 Silenzi et al., 2004
Coralli non tropicali ( <i>Cladocora caespitosa</i> )	da 0 a ~ -40 m	1850 AD - presente	da mensile a settimanale	SST; chimica dell'acqua marina	Silenzi et al., 2005 Montagna et al., 2007

Così, il mare Mediterraneo rappresenta un settore ideale per provare la capacità dei GCMs, dato che esso è fortemente influenzato dall'oscillazione del Nord Atlantico (North Atlantic Oscillation - NAO) e dalla zona di convergenza intertropicale (Intertropical Convergence Zone - ITCZ) (Cramp and O'Sullivan, 1999), la cui interazione è fondamentale nel determinare l'andamento degli eventi climatici del pianeta (Parrilla e Kinder, 1987), con importanti e rapidi cambiamenti correlati alle variazioni nell'input delle acque atlantiche a minor salinità attraverso lo stretto di Gibilterra.

Al fine di ottenere archivi capaci di descrivere le variazioni del livello marino, le temperature superficiali e la salinità del mare, nonché alcune delle sue variabili chimiche, con dettaglio e qualità del dato comparabile agli archivi costituiti dai coralli tropicali, è stato intrapreso lo studio di alcuni biocostruttori carbonatici: serpulidi (non presentati in questo lavoro; ampi riferimenti sull'utilizzo dei serpulidi concresciuti su speleotemi sommersi come archivi climatici possono essere trovati in Antonioli et al., 2001; 2004), vermeti e coralli non tropicali (Fig.1).

#### **Aspetti generali dell'approccio metodologico all'individuazione di nuovi archivi climatici**

La comprovata possibilità di estrarre dallo scheletro aragonitico dei coralli zooxantellati tropicali il segnale climatico, grazie alla determinazione della concentrazione degli isotopi stabili (principalmente ossigeno e carbonio) e di elementi in traccia (Weber e Woodhead, 1972; Smith et al., 1979; Beck et al., 1992), ha costituito la base delle esperienze scientifiche presentate in questo lavoro.

È stato possibile, infatti, applicare i metodi generalmente utilizzati sui coralli tropicali a due specie mediterranee che, sulla base dei loro tassi di accrescimento e della loro longevità, nonché della loro ecologia, si presentano come potenziali archivi: il Mollusco vermetide *Dendropoma petraeum* (ultimi 500 anni; alta risoluzione temporale per le temperature ed il livello del mare) e il corallo non-tropicale *Cladocora caespitosa* (ultimi 100 anni; altissima risoluzione temporale per la temperatura). I tassi di crescita relativamente bassi di questi due organismi hanno imposto l'utilizzo di tecniche analitiche avanzate, capaci di implementare la risoluzione spaziale delle porzioni di materiale analizzate, innalzare i limiti di rilevabilità, la precisione e l'accuratezza delle determinazioni delle concentrazioni degli isotopi stabili e degli elementi in traccia.

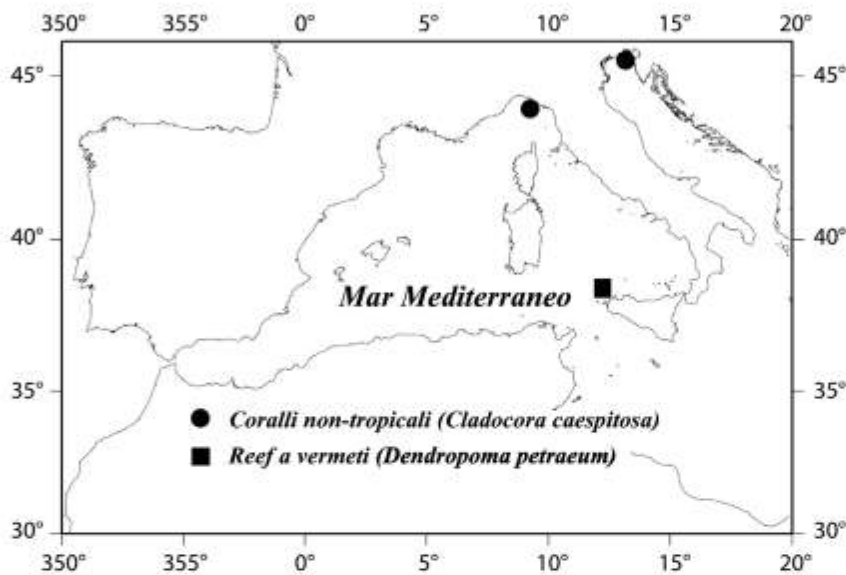


Figura 1 - Localizzazione dei dati discussi nella presente review relativi ai reef a vermeti ed al corallo non tropicale *Cladocora caespitosa* (rielaborata da Montagna et al., 2008a).

Per questo ci si è avvalsi dell'utilizzo di ICP-MS e/o MC-ICP-MS (*Multi Collector - Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrophotometer*) equipaggiati con un'adeguata (per lunghezza d'onda e potenza) apparecchiatura *laser-ablation* (LA).

L'approccio a questi potenziali nuovi archivi ad alta risoluzione non poteva esaurirsi, soprattutto per la mancanza assoluta di dati pregressi di carattere geochimico, nella semplice applicazione delle analisi normalmente usate sui coralli tropicali. Il percorso metodologico adottato per verificare che gli archivi biologici potessero essere utilizzati come *proxy* ambientali del Mediterraneo si è, perciò, articolato secondo il seguente schema di studi:

1) Studi preliminari:

- a) disponibilità degli archivi naturali attraverso l'individuazione dei siti di studio/campionamento;
- b) approfondimento delle caratteristiche biologiche ed ecologiche delle specie;
- c) caratterizzazione mineralogica e petrografica dei campioni;
- d) controllo della fisiologia della specie e della magnitudo dei tassi di crescita, distribuzione degli elementi nello scheletro (analogamente a quanto evinto per i coralli tropicali da Sinclair et al., 2006; Meibom et al., 2006; Gaetani e Cohen, 2006).

2) Analisi geochimiche ad alta risoluzione.

- 3) Correlazione fra parametri geochimici e dati ambientali per la calibrazione degli archivi naturali quali paleotermometri e paleo-misuratori ambientali.
- 4) Comparazione con altri archivi naturali globali e/o dati climatico-ambientali conosciuti nel Mediterraneo.



Questo approccio rappresenta la base per affrontare qualsiasi ricostruzione paleoclimatica attraverso l'utilizzo di nuovi archivi naturali.

Infatti, molti organismi, attraverso la registrazione del segnale isotopico nel proprio scheletro o guscio, possono potenzialmente fornire indicazioni sulle condizioni chimico-fisiche dell'ambiente in cui vivono, sebbene l'effetto delle funzioni metaboliche, la presenza di microstrutture nello scheletro, i fenomeni di diagenesi precoce, l'alterazione connessa all'attacco di microalghe e microrganismi possono alterare il segnale rendendo il loro utilizzo incerto e difficoltoso.

### I nuovi archivi naturali: aspetti generali

#### *I reef a vermeti*

I reef a vermeti sono formati dall'associazione tra alghe corallinacee incrostanti ed i vermeti, Molluschi gasteropodi gregari adattati a vivere nella fascia di transizione tra mesolitorale inferiore e la frangia infralitorale superiore, che si accrescono uno sull'altro, arrivando a formare dei veri e propri marciapiedi o reef (Fig. 2, a e b).

Scogliere a vermeti sono state rinvenute in molte località dei mari temperati del mondo, come nell'Oceano Atlantico lungo le coste del Senegal (Laborel e Delibrias, 1976), nelle Isole Bermuda (Stephenson e Stephenson, 1954), lungo la costa del Brasile (Van Andel e Laborel, 1964; Kemp e Laborel, 1968; Laborel e Delibrias, 1976; Angulo et al., 1999), a Curaçao (Focke, 1977), nelle Grand Cayman (Jones e Hunter, 1995) e nell'Oceano Pacifico nelle Isole Hawaii (Hadfield et al., 1972).

Nel Mediterraneo i vermeti sono distribuiti quasi unicamente nelle acque più calde del settore sudorientale e centrale-meridionale. Si possono osservare, infatti, lungo le coste di Israele, della Siria, del Libano, della Grecia, della Turchia, a Malta e nel sud dell'Italia e della Spagna (Safriel 1966, 1974; Delongeville et al., 1993; Pirazzoli e Montaggioni, 1989; Chemello et al. 1990, a e b; Pirazzoli et al., 1996; Azzopardi e Schembri, 1997; Antonioli et al., 1999).



Figura 2 – A sinistra: reef a vermeti nelle caratteristiche morfologie a piattaforma (più vicini a costa) e fungo durante una fase di bassa marea (al margine esterno del reef). A destra: particolare di un fungo durante l'alta marea. Sicilia nord-occidentale.

In virtù della loro termofilia, con il progressivo riscaldamento climatico olocenico, i vermeti si sono espansi dalle aree più meridionali del Mediterraneo a quelle centrali (Antonioli et al., 1999), seppure alcune teorie correlino la cinetica di colonizzazione dei vermeti alla distribuzione degli approdi fenici (Chemello in Russo, 1999).

Delle nove specie conosciute, *Dendropoma petraeum* e *Vermetus triquetrus* sono le specie che contribuiscono maggiormente alla costruzione di reef nel Mediterraneo (Chemello et al., 2000).

In particolare *D. petraeum* rappresenta la principale specie biocostruttrice in più del 90% di tutte

le strutture presenti lungo la costa della Sicilia (Chemello et al., 1990b). Questo è un gasteropode filtratore, con una conchiglia spessa chiusa da un opercolo particolarmente spesso ed efficiente (Fig. 3), in grado di isolare il mollusco durante le ore di emersione giornaliera connesse alla bassa marea. La porzione vivente dei *reef* si sviluppa, infatti, principalmente nella fascia corrispondente all'intervallo di marea. In misura minore, tuttavia, i vermeti del genere *Dendropoma* possono adattarsi a vivere anche nei primi metri della zona subtidale (Schiaparelli et al., 2006).

I *reef* hanno diverse forme (per una descrizione vedere Antonioli et al., 1999), con dimensioni che possono estendersi dalle poche decine di centimetri sino ad oltre 10 metri di ampiezza per alcuni chilometri di lunghezza.

Le scogliere si sviluppano lungo le coste rocciose a pendenza compresa tra 0° (orizzontale) e 40°, crescendo in direzione del largo.

I *reef* sono caratterizzati da una grande continuità laterale: dove sono presenti coprono più del 90% della linea di costa, contribuendo alla protezione dall'erosione.

La struttura delle colonie è strettamente legata alla loro età ed ai processi erosivi che insistono sulle diverse litologie del substrato roccioso.

Le forme a *ledge* (davanzale) si sviluppano lungo le coste più esposte ai marosi, come lungo i promontori e alla base delle falesie. Hanno dimensioni ridotte, con un'estensione di pochi decimetri. Tali strutture rappresentano una delle prime forme di colonizzazione di una costa da parte dei vermeti.

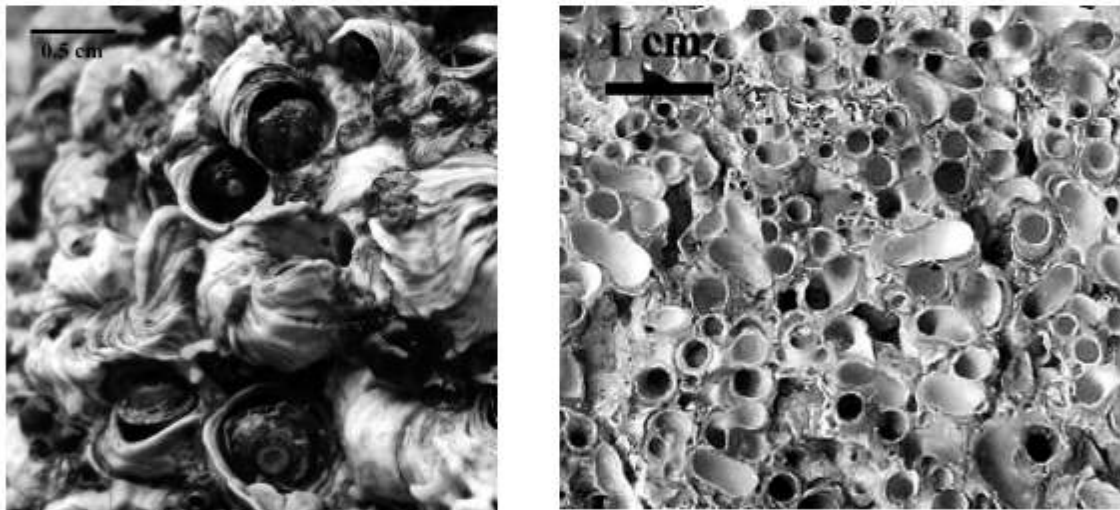


Figura 3 - Immagini macro di esemplari viventi di *Dendropoma petraeum* (a sinistra) e della relativa sezione (a destra); da quest'ultima si può comprendere la complessa sovrapposizione degli individui nei *reef*.

L'evoluzione delle colonie porta alla formazione delle piattaforme (Fig. 2a), veri e propri *reef* estesi anche per decine di metri e con spessori consistenti, anche di oltre 40 centimetri; sono le strutture più comuni.

La base di queste forme si presenta generalmente erosa, formando una sorta di piccola falesia sommersa mentre il profilo pianeggiante è correlabile all'azione del moto ondoso.

Lo sviluppo accelerato dell'erosione alla base di una piattaforma porta quest'ultima ad acquisire una struttura prominente verso il largo. Il proseguimento dei processi erosivi isola dei blocchi di substrato, con la conseguente formazione di microatolli. Così si sviluppano i *reef* a fungo (Fig. 2b).

Alla fine di questo processo i vermeti avranno colonizzato il pilastro di roccia in ogni sua direzione.

Il notevole sviluppo delle scogliere a vermeti, unitamente alla possibilità di datare con precisione col metodo del radiocarbonio ogni specifica porzione, permette di valutare con dettaglio l'evoluzione climatica nell'intervallo cronologico del loro accrescimento. Inoltre, grazie alla possibilità di correlare ad un errore definito (circa  $\pm 0.1$  m in Sicilia) una porzione dei *reef* al livello del mare è possibile, datando le porzioni fossili, ricostruire un modello di crescita descrittivo delle variazioni relative locali del livello marino.

Così, risulta essere di particolare rilievo l'utilizzo di questo archivio naturale nelle determinazioni paleoeustatiche. Infatti, carotaggi effettuati su barriere coralline (per es. Bard et al., 1996) hanno permesso di ricostruire a scala globale le variazioni del livello del mare dall'ultimo glaciale, cui si aggiungono, anche nel Mediterraneo, dati da sondaggi, *beachrock* e speleotemi sommersi, resti archeologici come le piscine romane di età imperiale (Lambeck et al., 2004a; b e bibliografia citata). Le osservazioni oloceniche sono perciò ben dettagliate sino a c.a 2000 anni fa anche nel Mediterraneo. I dati paleoeustatici disponibili riacquistano un'alta risoluzione temporale con l'inizio delle misure mareografiche (raramente oltre i 100 anni fa).

Tuttavia, l'intervallo di tempo circa corrispondente al periodo fra il XV e XIX secolo, che include la fine del Periodo Caldo Medioevale e la Piccola Età Glaciale (*Little Ice Age*, LIA), è cruciale per comprendere la risalita del livello del mare in una fase in cui alle oscillazioni naturali si sono sovrapposte quelle indotte dall'uomo. In tal senso, l'utilizzo dei *reef* a vermeti è di fondamentale importanza per coprire, con informazioni attendibili, questi secoli di storia.

Va tuttavia sottolineato che, sebbene la presenza di *reef* a vermeti fossili sia documentata per l'intero Olocene (Laborel e Laborel, 1996; Laborel et al., 2000), colonie attualmente viventi non sono più antiche di 500-600 anni (Antonioli et al., 1999; Silenzi et al., 2004): questo è dovuto all'instabilità strutturale dei *reef* che, raggiunte dimensioni critiche, vengono distrutti da eventi meteomarinari estremi o tsunami (Antonioli et al., 1999). Tale evidenza è ben testimoniata dall'attuale presenza di interi *reef* in depositi di tempesta, spiaggiati nell'entroterra anche a diverse decine di metri dalla linea di riva.

### Il corallo non-tropicale *Cladocora caespitosa*

*Cladocora caespitosa* L., 1758 è un corallo scleractinide zooxantellato (Fig. 4). Esso è uno dei più importanti organismi biocostruttori del Mediterraneo (Laborel, 1987) dove è largamente diffuso (Peirano et al., 2004). Fuori da questo mare, dove è endemico, il corallo può essere rinvenuto lungo coste atlantiche del Portogallo meridionale e del Marocco (Zibrowius, 1980).

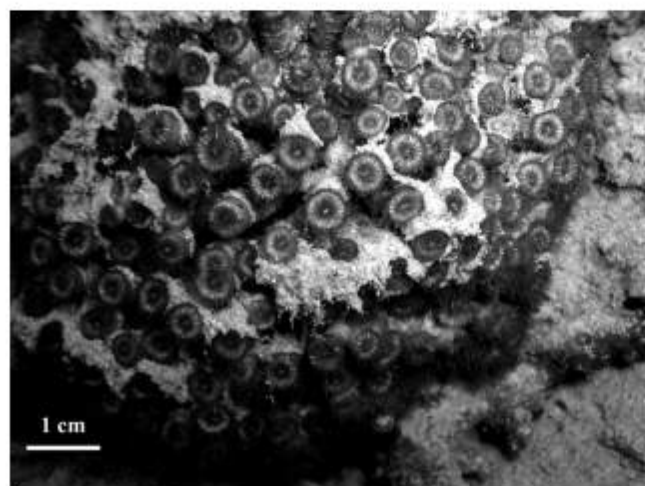


Figura 4 - Una colonia di *Cladocora caespitosa* proveniente dal Mar Ionio.



*Cladocora caespitosa* si sviluppa generalmente su fondali rocciosi all'interno della zona eufotica, fra pochi decimetri e -40 m. Essa si presenta in colonie subsferiche (dai 10 ai 30 cm di diametro massimo) o in banchi, formazioni massive alte alcune decimetri e sviluppate per diversi metri quadri (Peirano et al., 1998; Morri et al., 1994; Kühlmann, 1996; Schiller, 1993; Kružić e Požar-Domac, 2003; Kružić e Benković, 2008).

Le colonie sono caratterizzate dalla presenza di diversi coralliti disposti a raggiera, ognuno dei quali possiede pareti indipendenti dagli altri (Fig. 5) e si accresce circa-linearmente, con tassi variabili da 1.30 mm/anno (Peirano et al., 1999) a 6.2 mm/anno (Kružić e Požar-Domac, 2003).



Figura 5 - Esemplare di corallite di *Cladocora caespitosa*: intero (a sinistra) e in sezione (a destra).

Questa specie generalmente deposita due bande di accrescimento per anno, una ad alta densità (HD) durante il periodo invernale ed una a bassa densità (LD) durante quello estivo.

Campioni di *Cladocora caespitosa* provenienti dal Mar Ligure e studiati da Peirano et al. (1999), hanno mostrato che in novembre i singoli coralliti iniziano la deposizione della banda HD; questa entro marzo risulta completamente formata. La banda LD è depositata fra aprile e novembre.

Il lavoro di Montagna et al. (2007) mostra come il corallo termini ogni processo di deposizione del proprio scheletro carbonatico al di sotto della temperatura di 13.8°. *C. caespitosa* ha processi di accrescimento e calcificazione molto simili a quelli dei coralli tropicali, costruendo il proprio scheletro aragonitico in un'alternanza di centri di calcificazione e fibre aragonitiche.

Tutti questi aspetti hanno permesso di selezionare questa specie come un candidato ideale e colmare l'assenza, nel Mediterraneo, di un archivio naturale ad alta risoluzione capace di descrivere le variazioni dei principali fattori ambientali occorsi nell'ultimo secolo. Studi recenti (Silenzi et al., 2005; Montagna et al., 2007), presentati di seguito, hanno confermato questa potenzialità.

## I nuovi archivi naturali: principali risultati

### *I reef a Vermeti*

Antonioli et al. (1999), attraverso la datazione di porzioni fossili di reef a vermeti viventi, hanno ricostruito una curva di variazione del livello del mare in aree tettonicamente stabili della Sicilia nord-occidentale. Mediante la comparazione del livello medio del mare attuale con la profondità assoluta dei campioni fossili prelevati, gli Autori hanno determinato come 430±30 anni BP il livello relativo del mare si trovasse a -40±8 cm rispetto ad oggi (Fig. 6).

Tali dati hanno contribuito a calibrare i modelli glacio-idro-isostatici elaborati per questa regione del Mediterraneo (Lambeck et al., 2004b).

Ulteriori analisi, effettuate sulle stesse colonie, hanno permesso di dimostrare la potenzialità del

*D. petraeum* di essere un archivio delle variazioni della temperatura superficiale del mare attraverso l'analisi degli isotopi stabili dell'ossigeno (Silenzi et al., 2004).

È stato così possibile identificare, nel settore del Mare Tirreno Meridionale, la registrazione della LIA, occorsa fra il XVII e XIX secolo: in questo periodo la temperatura marina è risultata essere di  $1.99 \pm 0.37^\circ$  più bassa dell'attuale con valori che trovano riscontro in letteratura (Keigwin, 1996). Ulteriori elaborazioni (Montagna et al., 2008a) mostrano che, se si considera la mineralogia aragonitica del *D. petraeum*, così come riportato in Triolo et al. (2003), applicando l'equazione di frazionamento fra aragonite e temperatura superficiale del mare (SST; *Sea Surface Temperature*):

$$SST(^{\circ}) = 20.6 - 4.34 * (\delta^{18}\text{O}_{\text{carbonato}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{acquamarina}}) \quad (1)$$

con un  $\delta^{18}\text{O}_{\text{acquamarina}} = +1.3 \text{‰}$  V-SMOW (Pierre, 1999; SMOW, Standard Mean Ocean Water, rappresenta lo standard di riferimento delle acque marine), la temperatura media annuale durante la LIA era variabile fra 17.6 and 21.1 °C. Considerando che ogni campione analizzato in Silenzi et al. (2004) rappresenta un intervallo di 30-50 anni, ogni temperatura calcolata rappresenta la media su tale intervallo temporale.

Il trend di riscaldamento, successivo alla LIA, che ha caratterizzato il XX secolo si è interrotto intorno agli anni 1930-1940 quando, nei vermeti, si ha evidenza di una fase relativamente più fredda sino a metà degli anni '90 (Fig. 6).

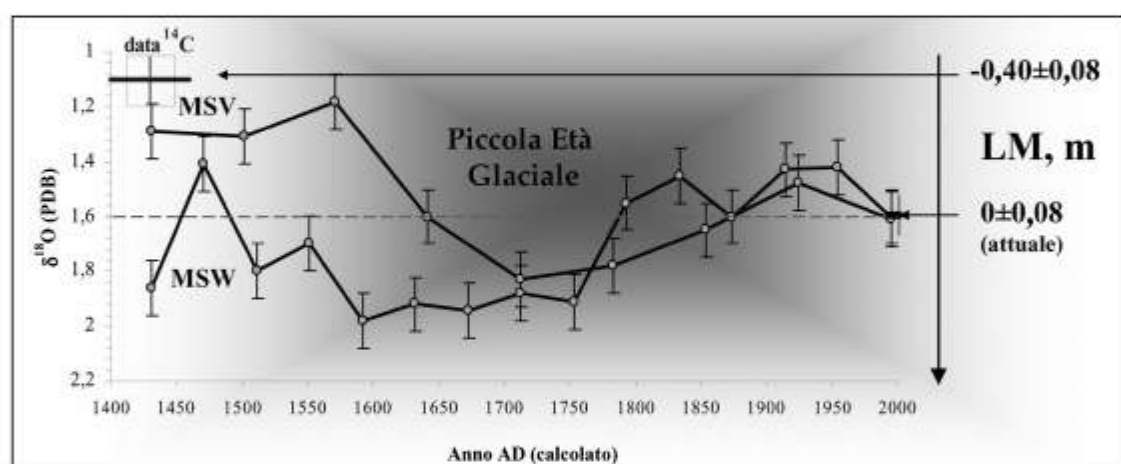


Figura 6 - L'immagine mostra i principali risultati ottenuti dall'analisi di un reef a vermeti: le datazioni con il  $^{14}\text{C}$  hanno permesso di determinare il livello del mare di circa 550 anni fa, mentre le analisi del  $\delta^{18}\text{O}$  mostrano l'andamento delle SST nel tempo, evidenziando l'oscillazione climatica relativa alla Piccola Età Glaciale (dati rielaborati da Silenzi et al., 2004; gli acronimi MSV e MSW rappresentano le sigle dei due transetti analizzati all'interno di un singolo reef).

### Il corallo non-tropicale *Cladocora caespitosa*

Il corallo *Cladocora caespitosa* è stato testato come potenziale archivio climatico ad alta risoluzione per la prima volta da Silenzi et al. (2005), attraverso la determinazione, in *bulk-analysis*, dell'andamento di elementi in traccia (principalmente Sr/Ca e Mg/Ca) ed isotopi stabili ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ). In un corallite vivente e particolarmente longevo, lungo 18 cm e collezionato a -28 m nel Mar Ligure, gli autori hanno campionato le bande di crescita HD succedutesi con continuità dal 1906 al 2000. Lo studio ha permesso di stabilire una significativa correlazione fra Sr/Ca e le SST derivate dall'*Integrated Global Ocean Service System* (IGOSS) per gli ultimi 20 anni (periodo di sovrapposizione fra il corallo e dati strumentali affidabili) da cui è stato possibile ricavare la seguente equazione:

$$\text{Sr/Ca (mmol/mol)} = 11.25 (\pm 0.38) - 0.079 (\pm 0.026) \text{ SST } (^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

Questa equazione mostra un coefficiente angolare ( $-0.079$ ) comparabile con equazioni di calibrazione SST vs. Sr/Ca ottenute sui principali coralli tropicali. Ciò suggerisce un meccanismo analogo di inglobamento dello Sr da parte delle specie tropicali di coralli quanto da parte di quelle temperate.

Il raffronto fra dati strumentali e coevi dati geochimici, ricavati dai rapporti  $\delta^{18}\text{O}$  e Mg/Ca, ha mostrato una correlazione meno significativa con le temperature marine, suggerendo come il segnale del  $\delta^{18}\text{O}$  possa essere in parte controllato dalla concentrazione degli isotopi nell'acqua marina, dalla presenza di materia organica inglobata nel corallo e dalla presenza di microstrutture di calcificazione secondaria.

I risultati preliminari di Silenzi et al. (2005) hanno permesso di stabilire come *C. caespitosa* possa essere un archivio climatico importante per ricostruire le SST. La successiva ricerca, illustrata in Montagna et al. (2007), ha approfondito le potenzialità degli elementi in traccia come paleotermometri grazie all'impiego di tecniche analitiche innovative.

In quest'ultimo lavoro, gli autori hanno applicato su un corallite di circa 4 cm, proveniente dalla Riserva Marina di Miramare (Golfo di Trieste, Mare Adriatico settentrionale), la tecnica che accoppia un ICP-MS alla *laser ablation*. Le analisi sono state condotte alla Research School of Earth Sciences di Canberra, presso l'Australian National University (ANU). Questa tecnica, che permette di analizzare porzioni attigue di scheletro dalla larghezza di circa 20 micron, consente di ovviare al problema di risoluzione connesso al sub-campionamento insito nell'analisi tradizionale, dove i campioni sono rappresentativi di porzioni più larghe di scheletro (per es. le intere bande HD), e quindi rappresentano intervalli temporali meno definiti; inoltre, tali campioni possono inglobare substrutture, depositi o parti diagenizzate che l'analisi laser permette di discriminare.

I rapporti fra Sr/Ca, B/Ca, Mg/Ca, U/Ca e Ba/Ca hanno evidenziato una significativa covarianza. Questa volta gli autori hanno confrontato i dati geochimici (in particolare B/Ca e Sr/Ca) con serie temporali delle SST misurate per 6 anni da una boa Mambo a pochi metri di distanza dal campione analizzato (Fig. 7).

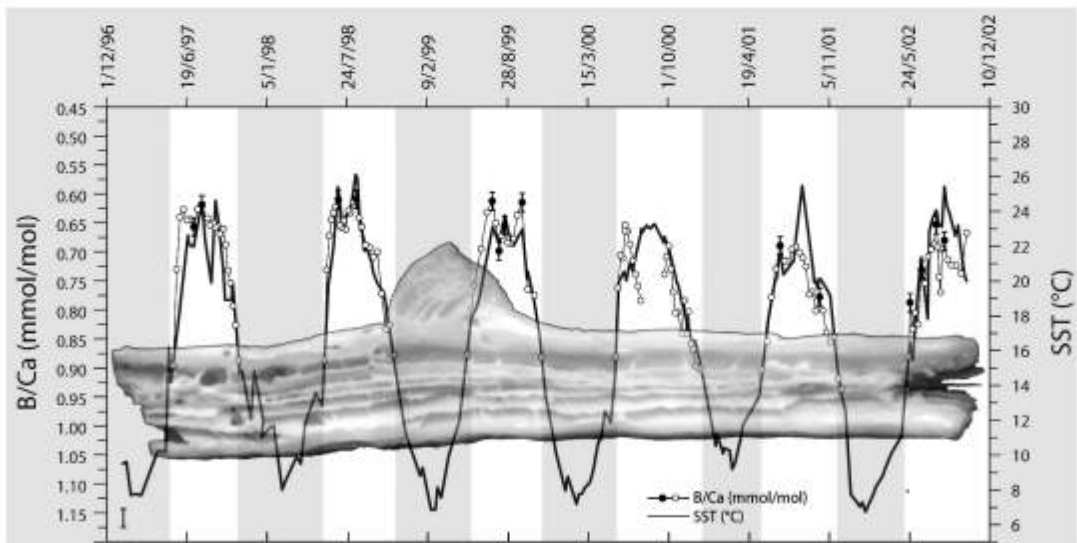


Figura 7 - La Figura mostra come i rapporti B/Ca, derivati dalle analisi della *Cladocoracaespitosadi* Diramare (Mare Adriatico settentrionale) si sovrappongono alla curva delle temperature (SST) misurate con una sonda multi-parametrica posizionata a pochi metri dal corallo; i dati invernali non sono registrati dal campione in quanto questa specie smette di accrescersi quando la temperatura scende sotto i  $13.8^{\circ}$  (dati rielaborati da Montagna et al., 2007). La fotografia del corallite è solo di esempio, non essendoci nella realtà l'esatta corrispondenza fra le date del grafico e le diverse porzioni del campione mostrato.

Questo ha permesso di calcolare le seguenti equazioni di correlazione:

$$\text{Sr/Ca (mmol/mol)} = 10.50 (\pm 0.13) - 0.073 (\pm 0.006) \text{ SST } (^{\circ}\text{C}) \quad (3)$$

$$\text{B/Ca (mmol/mol)} = 1.24 (\pm 0.03) - 0.024 (\pm 0.001) \text{ SST } (^{\circ}\text{C}) \quad (4)$$

In particolare, il rapporto B/Ca ha evidenziato una correlazione con le temperature marine caratterizzata da un indice particolarmente alto (coefficiente di Pearson=-0.856, numero dei dati elaborati=136). Ciò ha permesso, inoltre, d'identificare il minimo di temperatura per la quale si blocca il processo di accrescimento del corallo, pari a circa 13,8°.

Attualmente i dati provenienti da decine di campioni raccolti in diverse parti del Mediterraneo, ed analizzati con la tecnica LA, sono in corso di calibrazione con misure registrate da sonde posizionate localmente.

Ciò consentirà di discriminare gli effetti delle variazioni ambientali sul segnale geochimico, arrivando a definire curve di calibrazione valide per i diversi contesti mediterranei. Inoltre, un'approfondita ricerca, svolta in collaborazione con l'Acquario ed il Centro Scientifico di Monaco, dove quattro acquari sono stati così mantenuti alle temperature rispettive di 15°, 18°, 21° e 23°, ha permesso di calibrare il segnale geochimico registrato da coralli mantenuti a diverse e costanti temperature in microcosmi appositamente creati (Montagna et al., 2008b).

### Conclusioni

In questa breve *review* sono stati riassunti i metodi ed i principali risultati applicati e conseguiti nella ricerca di nuovi archivi climatici naturali per il mare Mediterraneo.

I dati presentati costituiscono gli elementi di base per ricostruire l'andamento decadale delle variazioni climatiche registrate nelle acque superficiali, nonché delle variazioni del livello del mare del Mediterraneo.

Il vermeto *D. petraeum* si è dimostrato un affidabile indicatore delle variazioni del livello marino e della temperatura delle acque nel corso degli ultimi 500 anni, permettendo così di indagare un periodo di tempo in cui si è assistito al passaggio da condizioni naturali a condizioni fortemente controllate dall'uomo, anche per l'immissione di gas serra nell'atmosfera.

La determinazione in *Cladocora caespitosa* dei principali segnali isotopici e geochimici che sono applicati nei coralli tropicali ( $\delta^{18}\text{O}$ , Sr/Ca, B/Ca, ecc.), ha permesso di stabilire come questa rappresenti un innovativo, affidabile nuovo archivio climatico ad alta risoluzione (circa bi-settimanale) per il Mediterraneo. In particolare, l'andamento dei rapporti B/Ca e Sr/Ca mostra un'alta correlazione con le SST.

### Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Giuseppe Mastronuzzi e Gigliola Valleri per la revisione del manoscritto e Rossella Baldaconi per la foto di Figura 4.

### Bibliografia:

- Angulo R.J., Giannini P.C.F., Suguio K. e Pessenda L.C.R. (1999) - *Relative sea-level changes in the last 5500 years in southern Brazil (Laguna-Imbituba region, Santa Catarina State) based on vermetid  $^{14}\text{C}$  ages*. Marine Geology, 159: 323-339.
- Antonioli F., Chemello R., Improta S. e Riggio S. (1999) - *Dendropoma lower intertidal reef formations and their palaeoclimatological significance, NW Sicily*. Marine Geology, 161: 155-170.
- Antonioli F., Silenzi S. e Frisia S. (2001) - *Tyrrhenian Holocene palaeoclimate trends from spelean serpulids*. Quaternary Science Reviews, 20: 1661-1670.



- Antonioli F., Bard E., Potter E.K., Silenzi S., Imbrota S. (2004) - *215-ka history of sea-level oscillations from marine and continental layers in Argentarola Cave speleothems (Italy)*. *Global and Planetary Change* 43: 57-78.
- Azzopardi L., Schembri P. J., (1997) - *Vermetid crusts from the Maltese Islands (Central Mediterranean)*. *Marine Life*, 7 (1-2): 7-16.
- Bard E., Hamelin B., Arnold M., Montaggioni L., Cabioch G., Faure G. e Rougerie F. (1996) - *Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge*. *Nature*, 382: 241-244.
- Beck, J.W., Edwards R.L., Ito E., Taylor F.W., Récy J., Rougerie F., Joannot P. e Henin C. (1992) - *Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios*. *Science*, 257: 644-647.
- Bengtsson L., Hodges K.I., Roeckner E. e Brokopf R. (2006) - *On the natural variability of the pre-industrial European climate*. *Climate Dynamics*, 27: 743-760.
- Bradley R.S., Hughes M.K. e Diaz, H.F. (2003) - *Climate in medieval time*. *Science*, 302: 404-405.
- Broecker W.S. (2001) - *Was the medieval warm period global?* *Science*, 291: 1497-1499.
- Chemello R., Dieli T., Antonioli F. (2000) - *Il ruolo dei "Reef" a Molluschi Vermetidi nella valutazione della biodiversità*. "Mare e Cambiamenti Globali", ICRAM, Roma, pp. 105-118.
- Chemello R., Gristina M., Toccaceli M., Badalamenti F., Riggio S. (1990a) - *Distribuzione delle formazioni a Molluschi Vermetidi lungo le coste siciliane*. Atti 53° Congresso UZI, Palermo, 60 pp.
- Chemello R., Pandolfo A. e Riggio, S. (1990b) - *Le biocostruzioni a Molluschi Vermetidi nella Sicilia Nord-Occidentale*. Atti 53° Congresso UZI, Palermo, 88 pp.
- Chemello R. in Russo G.F., (1999) - *Cambiamenti faunistici nel Mar Mediterraneo: un approccio zooarcheologico*. Accademia Internazionale di Scienze e Tecniche Subacquee di Ustica, Quaderno 22: "Mediterraneo: condizioni e sviluppi di cambiamento", pp. 63-73.
- Cramp A. e O'Sullivan G. (1999) - *Neogene sapropels in the Mediterranean: a review*. *Marine Geology*, 153: 11-28.
- Delongeville R., Laborel J., Pirazzoli P., Sanlaville P., Arnold M., Bernier P., Evin J. e Montaggioni, L. (1993) - *Les variations récentes de la ligne de rivage sur le littoral Syrien*. *Quaternaire*, 4: 45-53.
- Duffy P.B., Govindasamy B., Iorio J.P., Milovich J., Sperber K.R., Taylor K.E., Wehner M.F. e Thompson S.L. (2003) - *High-resolution simulations of global climate, part 1: present climate*. *Climate Dynamics*, 21: 371-390.
- Focke J.W. (1977) - *The effect of a potentially reef-building vermetid community on an eroding limestone coast, Curacao, Netherland Antilles*. *Proceedings of the 3rd International Coral Reef Symposium, Miami*, Vol. 1: 239-245.
- Gaetani G.A. e Cohen A.L. (2006) - *Element partitioning during precipitation of aragonite from seawater: a framework for understanding paleoproxies*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 4617-4634.
- Govindasamy B., Duffy P.B. e Coquard J. (2003) - *High-resolution simulations of global climate, part 2: effects of increasing greenhouse gases*. *Climate Dynamics*, 21: 391-404.
- Hadfield M.G., Kay E.A., Gillette M.U. e Lloyd M.C. (1972) - *The Vermetidae (Mollusca Gastropoda) of the Hawaiian Islands*. *Marine Biology*, 12: 81-98.
- Hunt B.G. (2006) - *The Medieval Warm Period, the Little Ice Age and simulated climatic variability*. *Climate Dynamics*, 27: 677-694; doi:10.1007/s00382-006-0153-5.
- Jones B. e Hunter I. (1995) - *Vermetid buildups from Grand Cayman, British West Indies*. *Journal of Coastal Research*, 4: 973-983.
- Keigwin L.D. (1996) - *The Little Ice Age and medieval warm period in the Sargasso Sea*. *Science*, 274: 1504-1508.
- Kemp M. e Laborel J. (1968) - *Formations de vermetes et d'algues calcaires sur les cotes du Bresil*. *Rec. Trav. Stat. Mar. Endoume*, 43, 59: 9-23.

- Kružić, P. e Požar-Domac, A. (2003) - *Banks of the coral Cladocora caespitosa* (Anthozoa, Scleractinia) in the Adriatic Sea. *Coral Reefs*, 22, 536 pp.
- Kružić P. e Benković L. (2008) - *Bioconstructional features of the coral Cladocora caespitosa* (Anthozoa, Scleractinia) in the Adriatic Sea (Croatia). *Marine Ecology*, 29: 125-139.
- Kühlmann D.H.H. (1996) - *Preliminary report on Holocene submarine accumulation of Cladocora caespitosa* (L., 1767) in the Mediterranean. *Göttinger Arb Geol. Pälont.*, Sb2, pp. 65-69.
- Laborel J. (1987) - *Marine biogenic constructions in the Mediterranean, a review*. *Rep. Sci. Par natl. Port-Cros*, 13: 97-126.
- Laborel J. e Delibrias, G. (1976) - *Niveaux marins récents à vermetidae du littoral ouest Africain*. Assoc. Senegal. Etude Quat. Afr. Bull., 47: 97-110.
- Laborel J. e Laborel-Deguen F. (1996) - *Biological indicators of Holocene sea level and climatic variations on rocky coasts of tropical and subtropical regions*. *Quaternary International*, 31: 53-60.
- Laborel J., Laborel-Deguen F., Papageorgiou S., Evin J., Pirazzoli P.A. e Stiros S.C., (2000) - *Seismic coastal uplift in a region of subsidence: Holocene raised shorelines of Samos Island, Aegean Sea, Greece*. *Marine Geology*, 170: 41-58.
- Lambeck K., Anzidei M., Antonioli F., Benini A, Esposito E. (2004a) - *Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for modern sea level rise*. *Earth and Planetary Science Letter*, 224: 563-575.
- Lambeck K., Antonioli F., Purcell A. e Silenzi S., (2004b) - *Sea level change along the Italian coast for the past 10,000 yrs*. *Quaternary Science Review*, 23: 1567-1598.
- Meibom A., Yurimoto H., Cuif J.-P., Domart-Coulon I., Houlbrequé F., Constantz B., Dauphin Y., Tambutté E., Tambutté S., Allemand D., Wooden J. e Dunbar R. (2006) - *Vital effects in coral skeletal composition display strict three-dimensional control*. *Geophysical Research Letters*, 33, L11608, doi:10.1029/2006GL025968.
- Montagna P., McCulloch M., Mazzoli C., Silenzi S. e Odorico, R. (2007) - *The non-tropical coral Cladocora caespitosa as the new climate archive for the Mediterranean Sea: high-resolution (-weekly) trace element systematics*. *Quaternary Science Review*, 26: 441-462.
- Montagna, P., Silenzi, S., Devoti S., Mazzoli C., McCulloch M., Scicchitano G. e Taviani M. (2008a) - *Climate reconstructions and monitoring in the Mediterranean Sea: a review on some recently discovered high-resolution marine archives*. *Rendiconti Lincei*, 19: 121-140.
- Montagna P., López Correa M., Rüggeberg A., McCulloch M., Rodolfo-Metalpa R., Dullo W.C., Ferrier-Pagès C., Freiwald A., Henderson G., Mazzoli C., Russo S., Silenzi S. e Taviani M. (2008b) - *Coral Li/Ca in micro-structural domains as a temperature proxy*. *Goldschmidt 2008*, July 13-18 2008, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *Goldschmidt Conference Abstracts*, 69 pp.
- Morri C., Peirano A., Bianchi C.N. e Sassarini M. (1994) - *Present-day bioconstructions of the hard coral, Cladocora caespitosa* (L.) (Anthozoa, Scleractinia), in the Eastern Ligurian Sea (NW Mediterranean). *Biologia Marina Mediterranea*, 1: 371-372.
- Palmer T.N., Shutts G.J., Hagedorn R., Doblas-Reyes F.J., Jung T. e Leutbecher, M. (2005) - *Representing model uncertainty in weather and climate prediction*. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 33: 163-193.
- Parrilla G. e Kinder T.H. (1987) - *Oceanografía física del mar de Alboran*. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 4: 133-165.
- Peirano, A., Morri, C., Mastronuzzi, G. and Bianchi, C.N. (1998) - *The coral Cladocora caespitosa* (Anthozoa, Scleractinian) as a bioherm builder in the Mediterranean Sea. *Memorie Descrittive Carta Geologica d'Italia*, 52: 59-74.
- Peirano, A., Morri, C. e Bianchi, C.N. (1999) - *Skeleton growth and density pattern of the temperate, zooxanthellate scleractinian Cladocora caespitosa from the Ligurian Sea (NW Mediterranean)*. *Marine Ecology Progress Series*, 185: 195-201.

- Peirano A., Morri C., Bianchi C.N., Aguirre J., Antonioli F., Calzetta G., Carobene L., Mastronuzzi G. e Orrù P. (2004) - *The Mediterranean coral Cladocora caespitosa: a proxy for past climate fluctuations?* Global and Planetary Change, 40 (1-2): 195-200.
- Pierre C. (1999) - *The oxygen and carbon isotope distribution in the Mediterranean water masses.* Marine Geology 153: 41– 55.
- Pirazzoli P.A. e Montaggioni, L.F. (1989) - *Crustal block movements from Holocene shorelines: Rhodes Island, Greece.* Tectonophysics, 170 (1-2): 89-114.
- Pirazzoli P.A., Laborel J. e Stiros S.C. (1996) - *Earthquake clustering in the eastern Mediterranean during historical times.* Journal of Geophysical Research, 101 (B3), pp. 6083-6098.
- Safriel U. (1966) - *Recent vermetid formation on the Mediterranean shore of Israel.* Proceedings of the Malacological Society of London, 37: 27-34.
- Safriel U. (1974) - *Vermetid gastropods and intertidal reefs in Israel and Bermuda.* Science, 186: 1113-1115.
- Schiaparelli S., Alberelli G. e Cattaneo-Vietti R. (2006) - *Phenotypic plasticity of Vermetidae suspension feeding: a potential bias in their use as Biological Sea-Level Indicators.* Marine Ecology, 27: 44-53.
- Schiller C. (1993) - *Ecology of the symbiotic coral Cladocora caespitosa (L.) (Faviidae, Scleractinian) in the Bay of Piran (Adriatic Sea): I. Distribution and biometry.* Marine Ecology, 14: 205-219.
- Schneider T. (2006) - *The general circulation of the atmosphere.* Annual Review of Earth and Planetary Science, 34, 655-688.
- Seager R., Battisti D.S., Yin J., Gordon N., Naik N., Clement A.C., Cane M.A. (2002) - *Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters?* Journal of the Royal Meteorological Society, 128: 2563-2586.
- Silenzi S., Antonioli F. e Chemello R. (2004) - *A new marker for sea surface temperature trend during the last centuries in temperate areas: vermetid reef.* Global and Planetary Change, 40/1-2: 105-114.
- Silenzi S., Bard E., Montagna P. e Antonioli F. (2005) - *Isotopic and elemental records in a non-tropical coral (Cladocora caespitosa): Discovery of a new high-resolution climate archive for the Mediterranean Sea.* Global and Planetary Change, 49 (1-2), 94-120.
- Sinclair D.J., Williams B. e Risk M. (2006) - *A biological origin for climate signals in corals – trace element “vital effects” are ubiquitous in scleractinian coral skeletons.* Geophysical Research Letters, 33, L17707, doi:10.1029/2006GL027183.
- Smith S.V., Buddemeier R.V., Redalje R.C. e Houck J.E. (1979) - *Strontium-calcium thermometry in coral skeletons.* Science, 204: 404-407.
- Somot S., Sevault F. e Déqué M. (2006) - *Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the twenty-first century using a high-resolution ocean circulation model,* Climate Dynamics, 27: 851-879.
- Stephenson T.A. e Stephenson A. (1954) - *The Bermuda Islands.* Endeavour, 50: 72-80.
- Taviani M. (2002) - *The Mediterranean benthos from Late Miocene up to Present: ten million years of dramatic climatic and geological vicissitudes.* Biologia Marina Mediterranea, 9 (1): 445-463.
- Triolo R., Gorgoni C., Lo Celso F., Baron M., Pallante P., Schwahn D., Kentzinger E., Riso A. e Ruffo L. (2003) - *Application of the USANS Technique in Natural Sciences and Archaeometry.* Abstracts of Scientific Presentations of the first workshop of the International Consortium on Ultra-Small-Angle Scattering (IConUSAS), Oak Ridge, pp. 27.
- Van Andel T. e Laborel J. (1964) - *Recent high relative sea level stand near Recife, Brazil.* Science, 145: 580-581.
- Weber J.N. e Woodhead P.M.J. (1972) - *Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonates.* Journal of Geophysical Research, 77: 463-473.
- Zibrowius H. (1980) - *Les Scléractiniaires de la Méditerranée et de l'Atlantique nord-oriental.* Mém. Inst. Océanogr., 11: 1-284.



## Valutazione dell'idoneità di materiali flyschoidi derivanti da scavo in sottoterraneo per interventi di ripascimento di spiagge ghiaiose

Carlo Cavallo<sup>1</sup>, Andrea Cevasco<sup>2</sup>, Marco Ferrari<sup>2</sup> e Michele Piazza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Regione Liguria - Settore Ecosistema Costiero, Via D'Annunzio, 111 - 16121 Genova

<sup>2</sup>Dip.Te.Ris. - Università degli Studi di Genova, Corso Europa, 26 - 16132 Genova;  
ferrari@dipteris.unige.it

### Riassunto

Vengono esposti e discussi i risultati di uno studio finalizzato alla valutazione dell'idoneità di materiali di natura eterogenea per interventi di ripascimento di spiagge ghiaiose. Numerosi campioni rappresentativi dei materiali in oggetto, che derivano da scavi in sottoterraneo ed appartengono al Flysch di Sanremo, sono stati prelevati in due differenti siti ed indagati attraverso analisi petrografiche e geotecniche al fine di valutarne la stabilità in ambiente litoraneo. L'indagine è stata effettuata non solo attraverso la valutazione della resistenza all'usura dei materiali ma anche in relazione ai fenomeni di alterazione potenzialmente indotti dagli agenti atmosferici e marini. In considerazione della carenza di studi, in letteratura, sulla durevolezza dei materiali in ambiente litoraneo, si è ritenuto opportuno effettuare una serie di test di durevolezza apportando diverse modifiche alle modalità di prova standardizzate. Le prove sono state effettuate sia sul materiale di risulta, sia sul materiale di spiaggia. I risultati ottenuti, aldilà delle difficoltà di lettura legate all'eterogeneità litologica dei campioni analizzati, hanno evidenziato il differente comportamento dei materiali di risulta che subiscono, al contrario dei sedimenti litorali, importanti fenomeni di alterazione, disgregazione ed usura.

Relativamente agli aspetti metodologici, pur tenendo in considerazione il numero limitato di test effettuati, l'utilizzo incrociato dei dati provenienti dalle diverse tipologie di prove effettuate ha dimostrato di poter fornire informazioni utili per valutare l'idoneità dei materiali in oggetto per interventi di ripascimento di spiagge ghiaiose.

**Parole chiave:** Flysch di Sanremo, Point Load Test, Slake Durability Test, ripascimento, spiagge in ghiaia.

### Abstract

*In this paper are exposed and discussed the results of a research to evaluate the suitability of heterogeneous material to be used for gravel beach nourishment works. A large number of samples representative of that material, deriving from tunneling works in the "Flysch di Sanremo" geological formation, have been taken in two different sites and have been analysed both from petrographic and geotechnical point of view aiming to verify their stability on littoral environment. The analyses were carried out not only to evaluate the strength of the material but also to look into alteration processes induced by atmospheric and marine agents. Considering the lack of studies on durability of material in littoral environment, a number of little modifications have been introduced on the standard*

*durability tests. The tests have been carried out both on drilled and natural beach material. The results, besides the difficulties due to the heterogeneity of the samples' litology, put in evidence the behaviour of the drilled material in terms of great rate of wear and deterioration compared to that of beach material.*

*Concerning methodological aspects, a proper use of the test results is confirmed as a good tool to evaluate the suitability of drilled material for gravel beach nourishment works.*

**Keywords:** *Sanremo Flysch, point load test, slake durability test, nourishment, gravel beach.*

## Introduzione

I materiali provenienti da lavori di scavo (gallerie, fondazioni, sbancamenti) sono, in alcuni casi, utilizzati negli interventi di ripascimento di litorali ghiaiosi. In Liguria, vi è una consolidata tradizione di interventi effettuati adottando questa tipologia di materiale, a tale proposito si possono citare i primi interventi di ripascimento effettuati negli anni '60 - '70 del secolo scorso (Hamm et al., 2002).

L'utilizzo di questo materiale offre il vantaggio di razionalizzare e, soprattutto, sfruttare al meglio le risorse naturali, riducendo sensibilmente gli impatti ambientali dovuti all'attività umana. Però, questi materiali spesso presentano caratteristiche litologiche e tessiturali che obbligano gli operatori ad intervenire su di essi prima del loro utilizzo.

Gli aspetti maggiormente penalizzanti sono individuabili nella presenza di clasti di grosse dimensioni spesso associati ad un'abbondante componente fine, che obbligano a trattare il materiale attraverso la frantumazione ed il lavaggio; queste operazioni però producono clasti con forme irregolari e spigolose quindi, almeno nelle fasi iniziali successive all'intervento, qualitativamente poco adatte all'utilizzo in spiagge destinate a scopi balneari.

Il secondo aspetto, spesso trascurato, riguarda le caratteristiche composizionali e tessiturali del materiale utilizzato. Infatti, il detrito naturale generato dall'alterazione delle rocce ad opera degli agenti naturali, subisce prima di giungere al litorale, una importante elaborazione ad opera degli agenti di trasporto e, successivamente, anche ad opera del mare. Questi processi producono una selezione che determina un alto grado di elaborazione tessiturale ai sedimenti che costituiscono il litorale (Carter, 1988).

Per contro, il materiale di scavo, non subendo alcun tipo di elaborazione ad opera degli agenti naturali prima dell'immissione nella spiaggia, spesso presenta comportamenti inaspettati da cui possono derivare importanti perdite di materiale oltre che sensibili danni all'ambiente stesso (Gonzalez-Correa et al., 2008).

Queste problematiche sono tanto maggiori quanto più è elevato il grado di variabilità composizionale della roccia originaria. Un esempio di questo fenomeno può essere osservato considerando il complesso delle unità flyschoidi (complessi di base argillitici, torbiditi arenaceo-pelitiche, torbiditi calcarenitiche e calcareo-marnose), che complessivamente denotano una variabilità litologica relativamente elevata.

In questo lavoro vengono, appunto, presentati i risultati relativi allo studio di litotipi riferibili ad una formazione flyschoidale della Liguria di Ponente (Flysch di Sanremo). Questo materiale è stato indagato al fine di valutarne l'idoneità a scopi di ripascimento. Lo studio è stato sviluppato attraverso analisi petrografiche e geotecniche che potessero valutarne efficacemente la stabilità in ambiente litoraneo anche in relazione della presenza di una abbondante matrice clastica argillosa. Quindi l'indagine è stata effettuata non solo attraverso la valutazione della sua resistenza all'usura ma anche in relazione ai fenomeni di alterazione provocati dagli agenti atmosferici e marini.

### Inquadramento geologico dell'area considerata

Geologicamente, l'area si colloca nel settore delle Alpi Liguri costituito dalle successioni sedimentarie flyschoidi, originariamente pertinenti al Dominio oceanico Piemontese-Ligure: tali successioni sono genericamente caratterizzate da un insieme basale prevalentemente argillitico ("Complessi di base" Auctt.) sul quale riposa stratigraficamente l'insieme dei corpi torbiditici noti in letteratura geologica come Flysch ad Helmitoidi. L'assetto strutturale del settore considerato, peraltro sostanzialmente coerente con quello di tutto il complesso flyschoidi della Liguria di Ponente, vede una successione di pieghe chilometriche con assi orientati WNW-ESE e superfici assiali immergenti verso NE, alle quali si sovraimpingono fasce di taglio semifragili con giacitura sub-verticale e direzioni notevolmente disperse (Giammarino et al., in stampa). Va rilevato che, nell'area considerata, affiorano solamente litotipi riferibili alla formazione del Flysch di Sanremo (Unità Sanremo - Monte Saccarello), rappresentati essenzialmente da corpi torbiditici marnosi, calcarenitici e calcilutitici organizzati in strati spessi con interstrati arenaceo-argillitici (Sagri, 1984; Giammarino et al., in stampa). Queste successioni sono interpretabili come il risultato di una sedimentazione per correnti di torbida su di una piana oceanica ubicata al di sotto della CCD e vengono attribuite al Campaniano superiore - Maastrichtiano superiore (Giammarino et al., in stampa).

Sotto il profilo litologico Sagri (1984) ha individuato all'interno del Flysch di Sanremo quattro gruppi di litotipi predominanti: a) arenarie calcaree, arenarie e siltiti; b) marne siltose; c) calcilutiti, d) argilliti; i diversi litotipi si associano in varie percentuali dando luogo a tre tipi differenti di strati torbiditici (marnoso-arenacei, calcilutitici, arenaceo-argillitici). Essi costituiscono quattro litofacies caratterizzate, sostanzialmente, da una organizzazione ordinata ma con percentuali differenti degli strati precedentemente descritti. La loro distribuzione geografica è schematizzata in Figura 1.

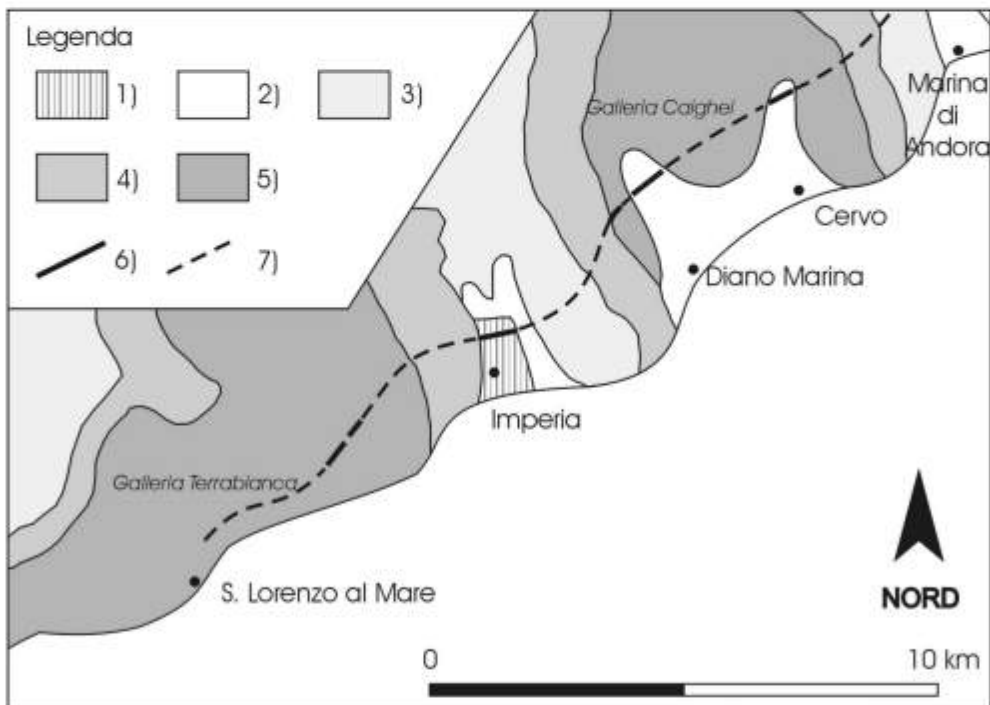


Figura 1 - Schema geologico dell'Unità Sanremo - M.te Saccarello (modificato da Sagri, 1984) con indicazione del tracciato del raddoppio ferroviario Andora - San Lorenzo in corso di realizzazione (ridisegnato da R.F.I., 2005). Legenda: 1) aree urbanizzate; 2) alluvioni e depositi marini; 3) litofacies B: prevalenza di marne e arenarie calcaree, presenza di calcilutiti e torbiditi arenaceo-argillitiche; 4) litofacies C: torbiditi arenaceo-argillitiche e calcilutiti cui si intercalano megatorbiditi marnoso-arenacei; 5) litofacies D: prevalenza di torbiditi arenaceo-argillitiche con intercalazioni di calcilutiti, rari strati marnoso-arenacei; 6) tratti in aperto, ponti, viadotti; 7) tratti in galleria.

Il materiale di risulta studiato proviene dalle gallerie, attualmente in corso di realizzazione, della nuova linea ferroviaria nel tratto S. Lorenzo al Mare - Andora (Riviera Ligure di Ponente) che si sviluppa appunto, in larga misura, nelle unità considerate (Fig. 1). Il tracciato, lungo 18825 m, si sviluppa per 16224 m in galleria. Lo scavo è effettuato con differenti modalità, definite in relazione alle caratteristiche litologiche e geomeccaniche individuate in fase progettuale. In coincidenza dei litotipi più tenaci lo scavo è eseguito mediante l'utilizzo di una fresa meccanica; quest'ultima verrà utilizzata per realizzare quattro delle nove gallerie previste per un totale di 12824 m. I restanti 3800 m, che si sviluppano in coincidenza di rocce più scadenti, sono invece realizzati con tecnica classica, cioè con ripper, martello pneumatico ed eccezionalmente esplosivo. Nell'area del cantiere di Andora sono presenti i materiali di risulta provenienti dalle gallerie realizzate con scavo meccanizzato (materiale *AN*); il materiale derivante dallo scavo con tecnica tradizionale è stato, invece, raccolto nel cantiere di S. Lorenzo (materiale *SL*).

I materiali *AN* e *SL* sono rappresentativi, rispettivamente, della galleria Caighei (2693 m), che collega S. Bartolomeo al Mare con Diano Marina, e delle gallerie Poggi (2129 m), Protesi Rio Inferno (140 m) e Terrabianca (466 m), colleganti S. Lorenzo al Mare rispettivamente con Imperia la prima e con il nuovo tracciato ferroviario le altre due.

### Indagini di laboratorio

Sui materiali *AN* e *SL*, prelevati nei siti di temporaneo accumulo, sono state svolte analisi di laboratorio petrografiche e geotecniche.

L'analisi petrografica è consistita essenzialmente in uno studio di sezioni sottili al microscopio polarizzatore finalizzato al riconoscimento del tipo litologico e delle componenti scheletriche ed interstiziali, le valutazioni percentuali dei componenti sono di tipo semiquantitativo ed ottenute con l'ausilio delle tavole di comparazione (ad es. Baccelle e Bosellini, 1965).

Le analisi geotecniche hanno compreso prove per la stima della resistenza a compressione uniassiale (Point Load Test) e test di durezza (Slake Durability Test) sui materiali oggetto di studio. Per quanto riguarda le prime sono stati testati 143 campioni di materiale *AN* e 152 campioni di materiale *SL*. I test di durezza sono stati svolti con differenti modalità di prova, modificando la metodologia di prova standardizzata ASTM, per un totale di 25 test.

### Point Load Test

La prova, assai semplice, consente di ottenere il valore dell'Indice di carico puntuale ( $I_c$ ) di un provino di materiale roccioso di forma qualsiasi inserito fra due punte coniche e sottoposto ad un carico crescente fino a rottura. Noti il valore del carico di rottura e le caratteristiche geometriche del campione è possibile calcolare il valore di  $I_s$ , che può essere correlato, attraverso un coefficiente opportuno ( $K$ ), alla resistenza a compressione monoassiale ( $\sigma_c$ ). Tale tipologia di prova è largamente impiegata in alternativa alle consuete prove UCS sia per la semplicità dell'attrezzatura necessaria (infatti può essere effettuata, oltreché in laboratorio, anche con attrezzatura portatile) sia per la possibilità di utilizzare campioni di dimensioni irregolari.

Per ogni campione analizzato è stato dapprima registrato il valore del carico di rottura ( $P$ ) e successivamente, in funzione della relativa geometria, ricavato il valore dell'indice di carico puntuale ( $I_c$ ) secondo le procedure standard di riferimento (I.S.R.M., 1985). Poiché è noto, da evidenze sperimentali, che il valore del coefficiente  $K$  è largamente variabile e tende a diminuire per bassi valori di resistenza a compressione, per il relativo calcolo è stata adottata la procedura riportata in Palmström (1995), che suggerisce di variare il valore di  $K$  in funzione del valore ottenuto di  $I_s$ .



### **Slake durability test**

La metodologia standard ASTM (A.S.T.M., 2007) prevede l'utilizzo di un apparato costituito da un cilindro, realizzato con una griglia con maglia 2 mm, collegato ad un sistema che permette di imporre una rotazione di 20 giri al minuto. All'interno del sistema sono inseriti 10 clasti, di dimensioni 20 - 30 mm, per un totale di  $500 \pm 50$  g immersi in acqua distillata. Al termine di ogni prova il campione è fatto essiccare ad una temperatura di 105°C per 24 ore. Ogni ciclo (essiccazione + prova) permette di definire l'indice di durevolezza ( $I_{Dn}$ ), definito dalla percentuale di materiale rimanente all'interno del cilindro; si considera quindi il materiale usurato quello che fuoriesce dal cilindro cioè con dimensioni minori di 2 mm.

La prova sostanzialmente consiste nel sottoporre il campione non solo all'usura imposta dall'apparecchiatura, ma anche allo stress causato dai cicli di essiccazione ed immersione. In letteratura sono presenti studi che hanno introdotto modifiche a questa procedura; variando i parametri che determinano le sollecitazioni, in modo da simulare le caratteristiche fisiche dell'ambiente da cui proviene il campione. A tale proposito sono stati effettuati esperimenti che esaltavano gli effetti dell'alterazione, utilizzando ad esempio l'acqua di mare per testare materiale proveniente da zone costiere (Dhakal et al., 2002; Dhakal et al., 2004), oppure facendo variare il pH della soluzione per valutare il comportamento del materiale sottoposto ad attacchi acidi (Gupta e Ahmed, 2007). Altri autori hanno, invece, optato per dare maggior peso all'usura modificando quindi la durata delle prove, ad esempio aumentando il numero dei cicli (Gökçeoğlu et al., 2000). Uno studio effettuato presso l'Oregon Department of Transportation (Stephen et al., 1999), ha invece portato la durata della prova a 30 minuti per i primi 4 cicli e di 1 ora per i successivi, ma senza essiccazione del materiale al termine di ogni ciclo. Questa variante risulta essere particolarmente interessante in quanto attribuisce una maggiore importanza alla continuità degli effetti dell'abrasione rispetto ai fenomeni di alterazione.

Poiché in letteratura non sono presenti studi sulla durevolezza dei materiali in ambiente litoraneo, si è ritenuto opportuno effettuare una serie di test apportando alcune modifiche alle modalità di prova standardizzate. Quindi, anche sulla scorta delle esperienze precedentemente descritte, sono stati realizzati, oltre alla prova standard (ST), diversi test che hanno previsto, rispettivamente:

- l'utilizzo di acqua di mare in sostituzione di quella distillata (STM H20 mare);
- l'essiccazione del campione a 60° anziché a 105° (STM 60°);
- l'abbinamento delle due precedenti tipologie (STM 60° + H20 mare);
- il mantenimento del campione in condizioni di immersione costante in acqua di mare (STM I);
- la variazione della durata della prova secondo quanto proposto da Stephen et al. (1999).

Ogni tipologia di prova è stata applicata a campioni di materiale AN e SL. Inoltre per valutare l'efficacia delle metodologie utilizzate sul materiale già elaborato, sono stati effettuati test su sedimenti provenienti da spiagge (sp), costituite da clasti riferibili al Flysch di Sanremo. Infine, sono state eseguite analisi su campioni misti, costituiti da clasti di spiaggia e materiale di risulta (AN + sp; SL + sp), allo scopo di valutare il comportamento di quest'ultimo a contatto con materiale di ambiente litorale.

### **Risultati della analisi di laboratorio**

#### **Analisi petrografiche**

L'analisi petrografica condotta sulle sezioni sottili ha permesso di distinguere i differenti litotipi oggetto dell'indagine (Fig. 2). In particolare il materiale del sito di S. Lorenzo è riferibile a due litotipi fondamentali:

a) siltite da media a grossa a cemento spatico e subordinata micrite. Lo scheletro (dimensioni 20-60  $\mu\text{m}$ ) è fortemente addensato e essenzialmente dato da elementi non carbonatici e carbonatici extrabacinali, quali quarzo sia metamorfico sia magmatico (circa 40%), mica bianca (circa 5-10%), minerali opachi (circa 5%), calcite detritica (circa 50%). I fillosilicati sono isoorientati. Le fratture riscontrate sono sigillate da calcite spatica in grandi cristalli. Apparentemente sterile ma con processi di ricristallizzazione piuttosto spinti;

b) siltite da media a grossa a cemento spatico e subordinata micrite. Lo scheletro (20-40  $\mu\text{m}$ ) è disperso e dato da non carbonatici e carbonatici extrabacinali e probabilmente carbonatici intrabacinali. La componente extrabacinale è essenzialmente costituita da quarzo sia metamorfico sia magmatico (circa 15-20%), calcite detritica (circa 30%), mica bianca (circa 5%), minerali opachi (circa 15%). Anche in questo caso i fillosilicati sono isoorientati. La componente intrabacinale è rappresentata da probabili resti fossili (circa 5%) in pessimo stato di conservazione.

Il materiale campionato nel sito di Andora è costituito da una biomicrite parzialmente ricristallizzata con subordinata frazione scheletrica extrabacinale sia carbonatica sia non carbonatica (dimensioni comprese fra 20 e 60  $\mu\text{m}$ ) data da quarzo (circa 5%), mica bianca + minerali opachi (circa 5%) e calcite detritica (circa 10%). La frazione scheletrica è, come anticipato, dominata dalla componente intrabacinale rappresentata da fossili più o meno ricristallizzati, fra i quali si riconoscono: foraminiferi bentonici e planctonici, probabili calcisferulidi e spicole di spugna (lunghe fino a 500  $\mu\text{m}$ ).

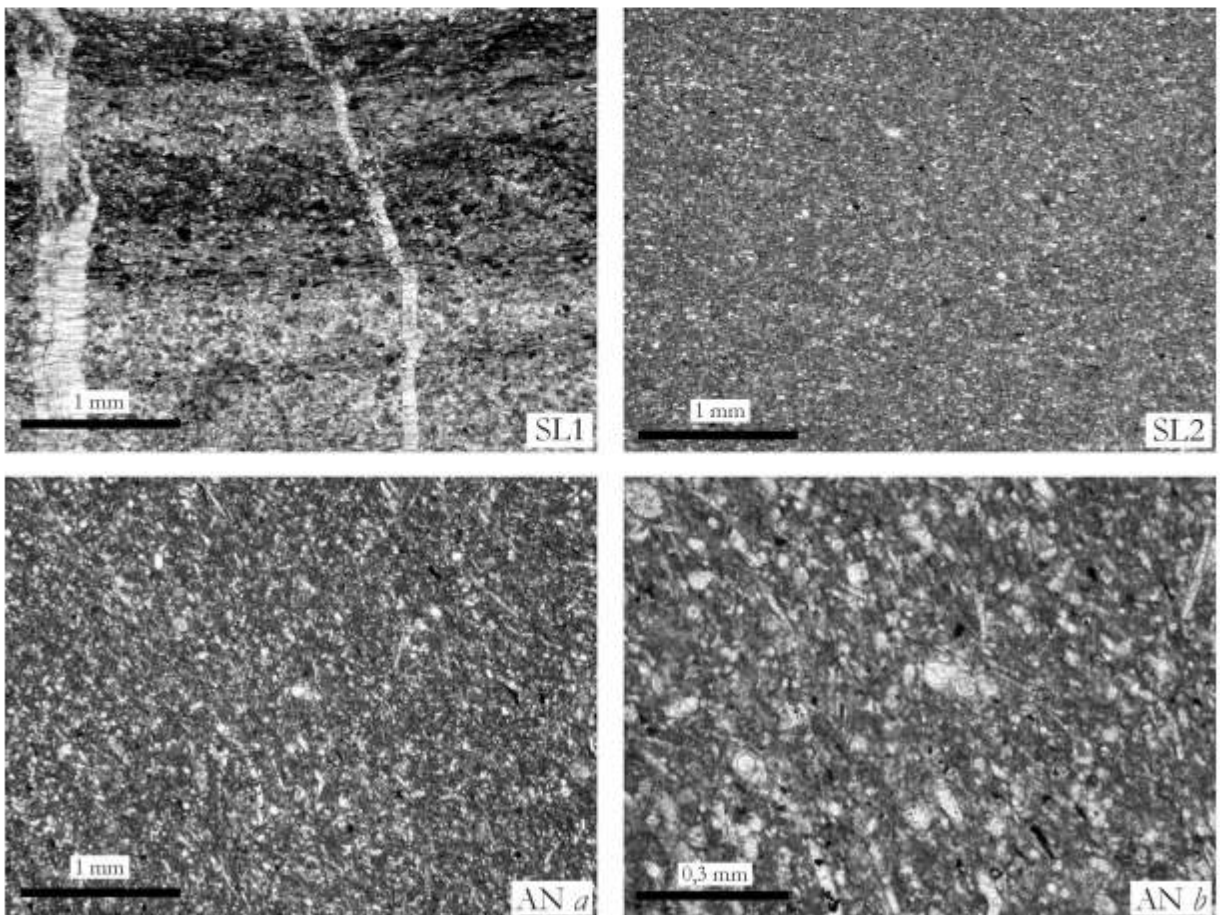


Figura 2 - Sezioni sottili del materiale campionato nei siti di San Lorenzo (campioni SL1 e SL2) e di Andora (AN).

### Point Load Test

I risultati ottenuti attraverso l'esecuzione dei Point Load Test evidenziano, per i campioni sottoposti alla prova, una notevole variabilità dei valori di resistenza a compressione monoassiale. Tale variabilità dipende, prevalentemente, dall'eterogeneità litologica dei termini facenti parte del Flysch di Sanremo.

In Tabella 1 sono riportati, in riferimento ai materiali *AN* ed *SL*, i valori medi (comprensivi delle relative deviazioni standard) e modali ottenuti per diverse associazioni di litotipi così suddivise: a) argilliti e siltiti argillose; b) marne massicce, calcari marnosi e calcilutiti; c) arenarie (talvolta con sottili intercalazioni siltose) e calcareniti.

Si osserva che i valori medi della resistenza a compressione monoassiale, relativi alle diverse associazioni considerate, risultano, nei due casi, simili. Quanto osservato sembra evidenziare che le differenze di comportamento meccanico eventualmente riscontrabili durante lo scavo di gallerie in diversi settori del Flysch di Sanremo, dipendano essenzialmente dalle differenti percentuali nelle quali si associano i vari litotipi che danno origine alle principali litofacies individuate da Sagri (1984).

Considerando il totale dei campioni sottoposti alla prova, i valori più bassi della resistenza a compressione monoassiale si riferiscono ai litotipi argillitici e argillitico-siltosi (media  $37 \pm 23$  MPa, moda  $15 \div 35$  MPa), aumentano notevolmente nelle marne massicce, nei calcari marnosi e nelle calcilutiti ( $123 \pm 68$  MPa, moda  $125 \div 150$  MPa) raggiungendo i valori massimi nelle arenarie e nelle calcareniti ( $168 \pm 76$  MPa, moda  $175 \div 200$  MPa).

Tabella 1 - Valori medi e modali di  $C_o$  (espressi in Mpa), ottenuti da Point Load Test per diverse associazioni di litotipi.

Formazione	litotipo	$C_o$ (moda)	$C_o$ (media)	n° campioni
Flysch di Sanremo (materiale <i>SL</i> )	argilliti, siltiti	15-35	$37 \pm 23$	38
	calcilutiti con intercalazioni siltose, calcari, calcilutiti, calcisiltiti	75-100	$122 \pm 77$	76
	arenarie	150-175	$164 \pm 63$	38
Flysch di Sanremo (materiale <i>AN</i> )	siltiti	50-75	55	1
	calcari marnosi, marne massicce, calcilutiti con intercalazioni siltose	125-175	$123 \pm 59$	94
	arenarie, calcareniti	175-200	$172 \pm 86$	48

Secondo la classificazione proposta dall'I.S.R.M. (1979) la resistenza delle associazioni prese in esame può essere considerata, sulla base dei rispettivi valori medi, da "media" a "elevata".

### Slake durability test

Le prove di laboratorio effettuate mostrano un notevole condizionamento dei risultati in funzione della natura dei singoli clasti. Risulta in tal senso significativo il fatto che in molti casi i clasti, provenienti da entrambi i siti, sottoposti alle differenti modalità di prova hanno fornito frammenti di forma lamellare a causa della fissilità dei litotipi cui essi appartengono.

In generale, comunque, sembra possibile affermare che il materiale *SL* presenti un sostanziale minor grado di durevolezza rispetto al materiale *AN*.

La Tabella 2 riassume i valori, per ogni prova effettuata, dell'indice di durevolezza ottenuto, rispettivamente, dopo 2 cicli ( $I_{D2}$ ) e 7 cicli ( $I_{D7}$ ). In base ai risultati ottenuti e facendo riferimento alla classificazione ASTM (A.S.T.M., 2007), i materiali *SL* e *AN* presentano, rispettivamente, una durevolezza "medio - elevata" e "molto elevata". L'analisi dei dati relativi a 7 cicli mostrano ( $I_{D7}$  in Tab. 2) che, indipendentemente dalla metodologia adottata nel corso della prova, il materiale *SL* subisce perdite molto significative; tali perdite possono raggiungere quasi il 60% ( $I_{D7} = 43.08$  % nella prova *ST* effettuata su materiale misto *SL + sp*).



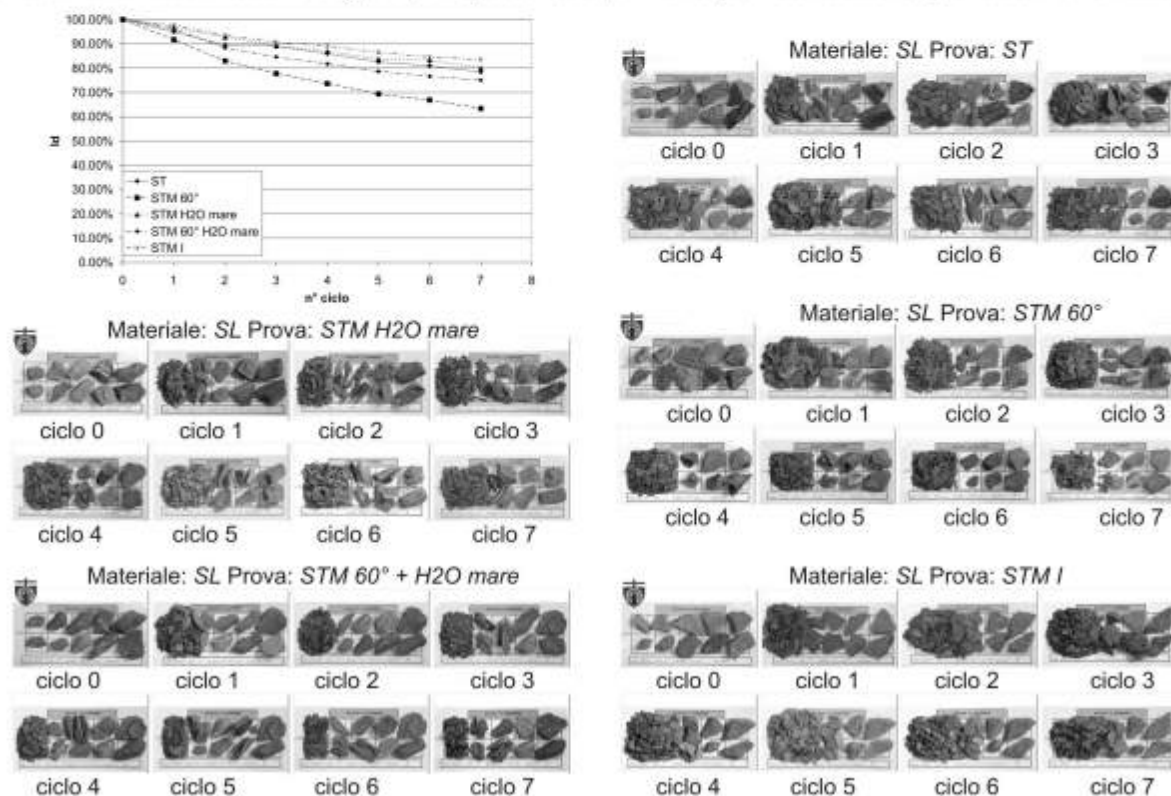
**Tabella 2 - Valori di  $I_{D7}$  delle prove effettuate, in grassetto le perdite più significative (le percentuali contrassegnate con \* sono riferite al solo materiale di risulta).**

Modalità di prova	<i>ST</i>		<i>STM H<sub>2</sub>O mare</i>		<i>STM 60°</i>		<i>STM 60° + H<sub>2</sub>O mare</i>		<i>STM I</i>	
	$I_{D2}$	$I_{D7}$	$I_{D2}$	$I_{D7}$	$I_{D2}$	$I_{D7}$	$I_{D2}$	$I_{D7}$	$I_{D2}$	$I_{D7}$
Materiale <i>AN</i>	98.70	97.45	94.71	<b>89.48</b>	98.19	94.86	95.85	<b>88.30</b>	98.99	95.96
Materiale <i>SL</i>	<b>89.51</b>	<b>78.37</b>	<b>82.97</b>	<b>63.34</b>	92.74	<b>80.02</b>	<b>88.37</b>	<b>75.01</b>	93.42	<b>83.56</b>
Materiale <i>sp</i>	99.77	99.65	99.77	99.49	99.78	99.64	99.86	99.71	99.93	99.72
Materiale misto* <i>AN + sp</i>	98.03	95.68	99.15	97.59	98.02	96.25	90.79	<b>61.70</b>	<b>88.20</b>	<b>84.33</b>
Materiale misto* <i>SL + sp</i>	<b>83.89</b>	<b>43.08</b>	90.66	<b>72.34</b>	<b>86.13</b>	<b>72.34</b>	<b>84.84</b>	<b>67.89</b>	<b>86.27</b>	<b>78.38</b>

Il materiale *AN* evidenzia, in generale, un miglior comportamento rispetto al precedente, con perdite generalmente più contenute anche se i risultati appaiono, in alcuni casi, contrastanti. Si osservano, ad esempio per le associazioni *AN + sp*, perdite estremamente contenute nelle prove *ST* e *STM H<sub>2</sub>O mare* (rispettivamente  $I_{D7} = 95.68\%$  e  $I_{D7} = 97.59\%$ ) mentre nei test *STM 60° + H<sub>2</sub>O mare* le perdite raggiungono valori prossimi al 40% ( $I_{D7} = 61.70\%$ ).

Un comportamento completamente differente è quello desumibile dai risultati registrati durante le prove realizzate su campioni di spiaggia (*sp*). In questo caso le perdite di materiale sono sempre  $<0.5\%$  ( $I_{D7} > 99.5\%$ ) e pertanto assai poco significative.

Per quanto riguarda il comportamento del materiale in funzione delle diverse modalità di prova anche in questo caso si è osservata una risposta differente da parte dei materiali *AN* e *SL*, anche se in entrambi i casi è risultata evidente una minore durezza dei materiali qualora testati in forma mista (associazioni *AN + sp* e *SL + sp* in Figg. 4 e 6). I risultati delle prove svolte sul materiale *SL* (Fig. 3) evidenziano che il relativo degrado, in questo caso, avviene prevalentemente per rottura e frammen-



**Figura 3 - Risultati dei tests di durabilità del materiale *SL* e variazione della forma dei clasti durante le differenti prove.**

tazione dei clasti mentre i fenomeni di usura, benché presenti, sono piuttosto limitati. Detto materiale sembra, inoltre, risentire maggiormente degli effetti dell'acqua marina rispetto a quelli indotti dalle variazioni di temperatura. Esso, infatti, durante il test *STM I* ha evidenziato una notevole frammentazione dei clasti pur mantenendo un valore piuttosto elevato dell'indice di durezza (83.56%). Lo stesso materiale, in associazione con ciottoli di spiaggia, (*SL + sp* in Fig. 4) ha mostrato un comportamento analogo al caso precedente ma, come precedentemente esposto, l'indice di durezza

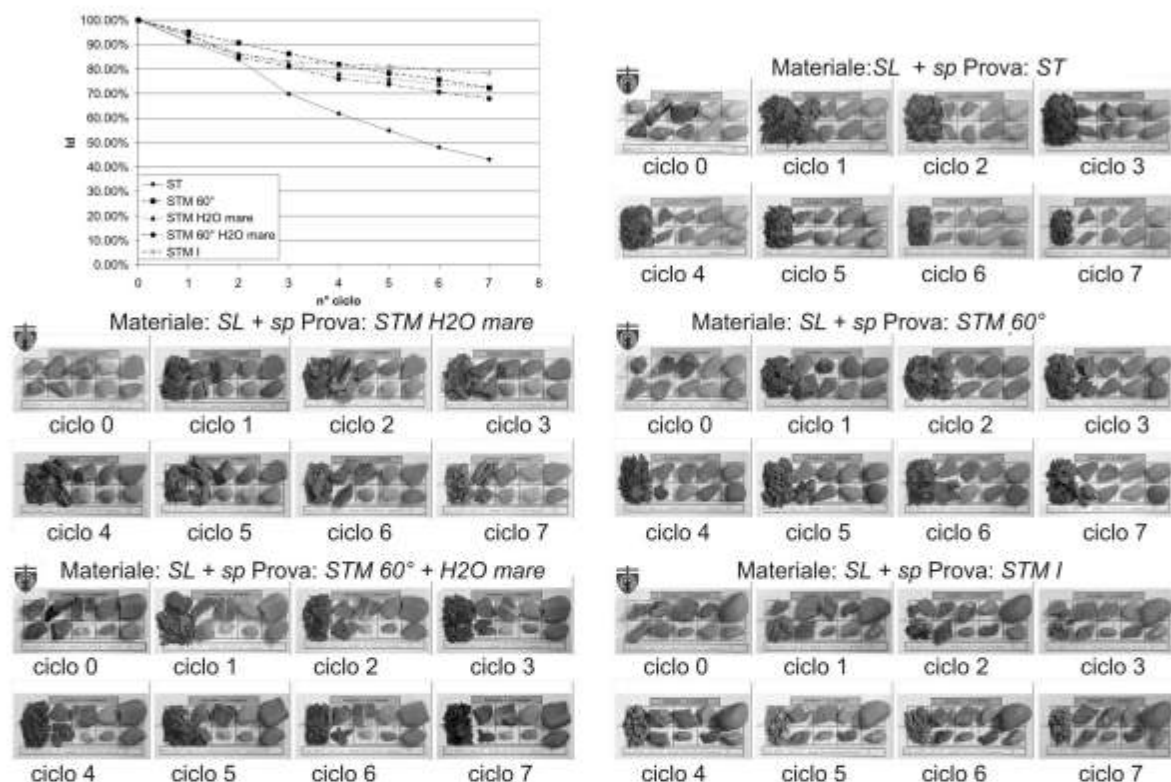


Figura 4 - Risultati dei tests di durabilità del materiale *SL + sp* e variazione della forma dei clasti durante le differenti prove.

è risultato decisamente inferiore (78.38 %). In tal caso, tuttavia, sono stati osservati, oltre a rottura e frammentazione dei clasti, anche rilevanti fenomeni di usura degli stessi.

I test effettuati sui materiali *AN* hanno evidenziato che questi subiscono in minor misura, rispetto ai materiali *SL*, i fenomeni di frammentazione e rottura (Fig. 5).

Questi ultimi, infatti, interessano solo occasionalmente singoli clasti. In tal caso i maggiori effetti sembrano potersi riferire sia allo stress termico che agli effetti dell'acqua marina.

La prova *STM I* è quella che ha fornito i più bassi valori dell'indice di durezza ma permane un certo margine di incertezza al riguardo poiché le perdite sono, in questo caso, dovute alla disintegrazione di un solo clasto e quindi potenzialmente influenzate dai relativi caratteri composizionali. La risposta dell'associazione di materiali *AN + sp* (Fig. 6) è relativamente buona; le perdite sono essenzialmente dovute ad usura o rottura dei clasti, raramente alla frammentazione dei medesimi. Ciò è stato riscontrato, tuttavia, solo nelle prove che hanno previsto l'utilizzo di acqua marina, a conferma della elevata capacità di alterazione di quest'ultima sul materiale in oggetto.

Infine le analisi tessiturali della frazione dispersa hanno mostrato una modesta prevalenza della frazione sabbiosa rispetto a quella pelitica. La pelite è risultata più abbondante nei campioni sottoposti a maggiori temperature e nel caso di immersione continua in acqua di mare. La frazione dispersa non sembra, invece, essere influenzata in alcun modo dal numero dei cicli di prova.

## Discussione

Le analisi petrografiche hanno evidenziato le differenze litologiche fra i materiali campionati nei due siti considerati. Il sito di S. Lorenzo risulta caratterizzato da silti da medie a grosse con interstiziali carbonatici e con scheletro più o meno addensato, una discreta variabilità è mostrata anche dalle proporzioni degli elementi scheletrici extrabacinali (ad es. il quarzo). Il sito di Andora è caratterizzato da biomicriti parzialmente ricristallizzate con una frazione clastica fortemente subordinata. Questa sostanziale differenza compositiva si traduce, ovviamente, in un differente risposta alle sollecitazioni geomeccaniche. Entrambe le prove effettuate (Point Load Test, Slake Durability Test) hanno evidenziato che il materiale *SL*, ed in particolare quello con frazione clastica meno abbondante, è dotato di caratteristiche di durezza inferiori rispetto a quelle proprie del materiale *AN*.

È necessario, tuttavia, considerare che le differenti modalità di scavo adottate nei due casi possono aver influenzato, seppure in parte, i risultati.

Infatti, è plausibile ritenere che dallo scavo con fresa, adottato nelle gallerie di Andora, tenda a derivare un materiale già selezionato, con maggiore presenza di frammenti stabili rispetto al materiale derivante dallo scavo con metodo tradizionale. Adottando le usuali classificazioni si osserva che i materiali provenienti da entrambi i siti risultano di qualità da "medio-elevata" a "molto-elevata", quindi i *range* di valori da esse utilizzati sembrano sovrastimare la qualità del materiale, specie se confrontato con quello proveniente dall'ambiente litorale. Infatti le prove di durezza effettuate sui materiali *sp*, che non hanno subito alcuna alterazione e/o sensibile perdita di materiale indipendentemente dalla metodologia adottata, ne indicano una sostanziale stabilità. Questo aspetto evidenzia che la tipologia di prova adottata non è particolarmente invasiva, se raffrontata agli stress prodotti dall'ambiente litorale sui sedimenti. Infatti, in tale ambiente gli effetti degli agenti naturali si esplicano non solo attraverso l'azione del moto ondoso, e la conseguente usura dei clasti causata

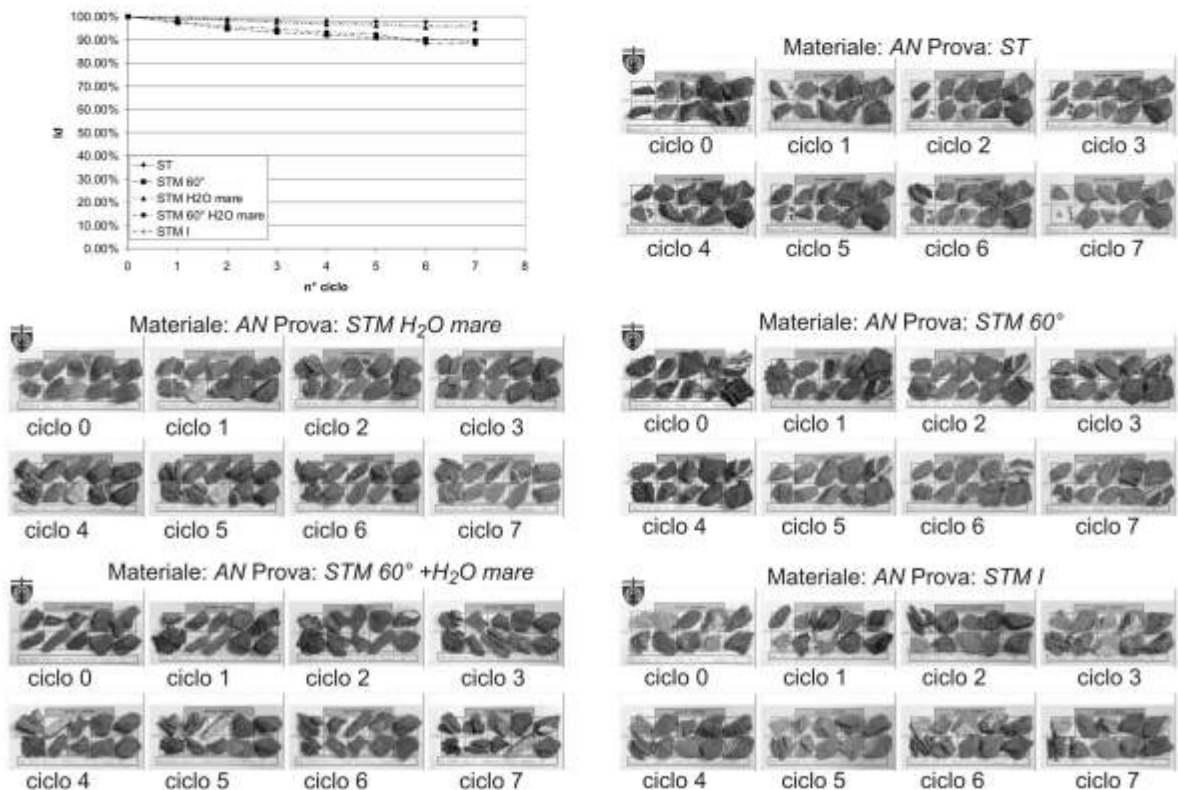


Figura 5 - Risultati dei tests di durabilità del materiale AN e variazione della forma dei clasti durante le differenti prove.

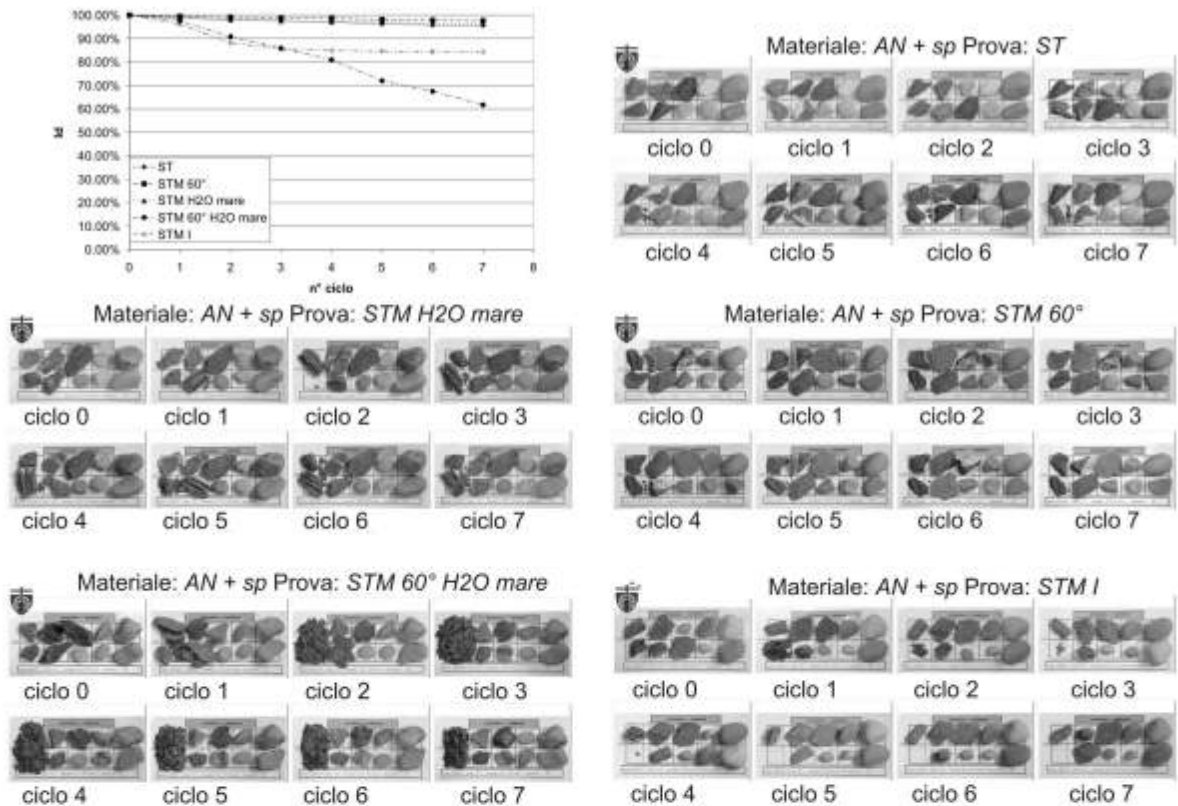


Figura 6 - Risultati dei tests di durabilità del materiale AN + sp e variazione della forma dei clasti durante le differenti prove.

dagli urti tra di essi, ma anche attraverso un'alterazione dei sedimenti ad opera degli agenti climatici, terrestri e marini, ed in particolar modo della temperatura, attraverso l'escursione termica, e dell'acqua marina a causa dell'elevato potere solvente.

Durante le prove di durezza il materiale di risulta, al contrario di quello di spiaggia, è quello che subisce, quindi, in maniera più evidente fenomeni non solo di abrasione ma anche di alterazione. L'aspetto più significativo è quello relativo alle sollecitazioni chimico-fisiche indotte. Il materiale risulta molto sensibile sia allo stress termico sia ai processi che possono derivare dalla presenza di acqua marina. In particolare i termini siltosi sembrano risentire maggiormente di questi ultimi, mentre gli altri litotipi, pur avendo un comportamento nel complesso migliore, sembrano subire in ugual misura gli stress indotti da entrambi. Per quanto riguarda la risposta dei materiali testati ai fenomeni di abrasione va evidenziato che questi ultimi risultano meno palesi rispetto ai precedenti, anche se presenti in tutti i casi. Dal confronto dei risultati ottenuti con le diverse prove questi effetti sembrano maggiori sui termini più tenaci (materiali AN) e più evidenti durante le prove in cui detti materiali sono stati associati a ciottoli di spiaggia. In quest'ultimo caso l'effetto degli urti sembra tradursi non solo in una maggior frantumazione ma anche in una maggiore abrasione. I risultati inerenti le modalità di usura si riflettono soprattutto sulla granulometria del detrito prodotto, costituito in parti pressoché uguali di frazione pelitica e sabbiosa. È inoltre verosimile ritenere che quest'ultima, in ambiente naturale, possa continuare nel tempo ad alterarsi dando origine, a lungo termine, ad una frazione esclusivamente fine.

In merito ai rapporti fra durezza e resistenza, l'elevata eterogeneità sotto il profilo litologico, strutturale e tessiturale dei campioni sottoposti alle relative prove non ha consentito di individuare una relazione univoca. È stato, tuttavia, possibile osservare un rapporto fra la resistenza dei



campioni e le modalità di usura degli stessi. In particolare è parso che nei termini caratterizzati da minore resistenza (argilliti e argilliti-siltose), che risultano predominanti nei materiali *SL* e sono interessati da un elevato grado di fissilità, tendano a prevalere i fenomeni di alterazione su quelli di abrasione. Il contrario avviene negli altri termini a maggiore resistenza (marne massicce, calcari marnosi, calcilutiti, arenarie e calcareniti), più diffusi rispetto ai precedenti nei materiali *AN*, dove prevalgono i fenomeni di abrasione.

Per quanto riguarda, infine, la validità dell'utilizzo della prova di durezza nella valutazione dell'idoneità dei materiali per possibili interventi di ripascimento, le metodologie adottate sono apparse utili nel caso dei litotipi in oggetto. Permangono, tuttavia, incertezze sull'interpretazione dei risultati, legate fundamentalmente all'impossibilità di definire compiutamente gli aspetti litologici, strutturali e tessiturali dei numerosi e differenti termini da cui derivano i clasti sottoposti alle prove.

È presumibile che nel caso in cui il materiale sottoposto alle prove di durezza presenti caratteristiche di relativa omogeneità ed isotropia, quindi laddove risultino più importanti i fenomeni abrasivi, si renda opportuno modificare le modalità di prova intervenendo, ad esempio, sui tempi di durata delle medesime, come proposto da Dickenson e Baillie (1999).

### Conclusioni

Il problema principale nell'interpretazione dei risultati ottenuti con il test di durezza, risiede nel fatto che non sono presenti in letteratura applicazioni per la valutazione dei materiali da impiegare nel ripascimento dei litorali. Inoltre, la natura stessa del materiale costituito da diversi termini a composizione variabile, introduce un ulteriore elemento di difficoltà. Ne consegue che una valutazione inequivocabile sull'idoneità, o meno, dei litotipi studiati risulta alquanto problematica. Il confronto tra i materiali derivanti dagli scavi in sotterraneo (*SL* e *AN*) e quelli provenienti dalla spiaggia (*sp*) ha comunque evidenziato in maniera chiara il differente comportamento dei primi, che subiscono, al contrario dei secondi, importanti fenomeni di alterazione, disgregazione ed usura; tali fenomeni risultano ulteriormente accentuati qualora il materiale di risulta degli scavi venga testato in associazione a ciottoli di spiaggia. Sulla base dei risultati ottenuti è possibile affermare che i litotipi provenienti dal sito di S. Lorenzo (materiale *SL*) presentano caratteristiche tali che li rendono scarsamente idonei ad un utilizzo per ripascimenti. Più complessa risulta l'interpretazione delle prove eseguite sul materiale proveniente dal sito di Andora (materiale *AN*). La risposta ai differenti test è risultata, spesso, contraddittoria e probabilmente conseguenza della occasionale presenza di ciottoli con frazione siltosa relativamente elevata. Inoltre, come si può osservare dai diagrammi rappresentativi dei test svolti, al termine della prova il materiale, in molti casi, non sembra avere ancora raggiunto condizioni di stabilità. Risulta anche evidente che questo materiale avrà tempi di usura decisamente inferiori rispetto a quello naturale. Ne consegue, necessariamente, che in caso di utilizzo a fini di ripascimento, sia da prevedere, nel caso del materiale in oggetto, una ridotta efficacia degli interventi, che si tradurrà in una maggiore frequenza degli stessi. Si ritiene, tuttavia, che l'abbondante frazione pelitica, che è presumibile si venga a formare nel tempo in conseguenza dell'usura del materiale, possa essere allontanata e dispersa dall'azione del moto ondoso. Per quanto riguarda gli aspetti metodologici, pur tenendo conto del numero limitato di test effettuati, l'utilizzo incrociato dei dati provenienti dalle diverse tipologie di prove effettuate in questo studio ha dimostrato di poter fornire informazioni utili per valutare l'idoneità del materiale per interventi di ripascimento. Si ritiene, infine, di grande interesse sia implementare le conoscenze acquisite attraverso questo studio, introducendo nuove modalità di prova e/o modificando quelle adottate, sia confrontare i risultati ottenuti in questa sede con nuove indagini relative a contesti litologici differenti.



**Bibliografia**

- A.S.T.M. (2007) - *D 4644-04. Test Method for Slake Durability of shales and similar weak rocks*. ASTM Vol. 04.08, Soil and Rock (I).
- Baccelle L. e Bosellini A. (1965) - *Diagrammi per la stima visiva della composizione percentuale nelle rocce sedimentarie*. - Ann. Univ. Ferrara, N.S., Sez. IX, Sci. Geol. Paleont., 1/3: 59-62.
- Carter R.W.B. (1988) - *Coastal environments*. Academic Press, London, pp. 617.
- Dhakal G.P., Yoneda T., Kato M. e Kaneko K. (2002) - *Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks*. Engineering Geology, 65: 31-45.
- Dhakal G.P., Kodama J., Yoneda T., Neaupane K. M. e Goto T. (2004) - *Durability characteristics of some assorted rocks*. J. Cold Regions Engineering, ASCE, 18: 110-122.
- Dickenson S.E. e Baillie M.W. (1999) - *Predicting scour in weak rock of the Oregon Coast range Final Report SPR 382*. Oregon Department of Transportation Research Group, OR 97301-5192, Salem. pp. 62.
- Giammarino S., Fanucci F., Orezzi S., Rosti D. e Morelli D. (in stampa) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50:000 - Foglio 258-271 San Remo*. A.P.A.T. - Regione Liguria. pp. 132.
- Gökçeoglu C., Ulusay R. e Sönmez H. (2000) - *Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles*. Engineering Geology, 57: 215-237.
- Gonzalez-Correa J.M., Fernandez Torquemada Y. e Sanchez Lizaso J.L. (2008) - *Long-term effect of beach replenishment on natural recovery of shallow Posidonia oceanica meadows*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 76: 834-844.
- Gupta V. e Ahmed I. (2007) - *The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India*. Engineering Geology, 95: 79-87
- Hamm L., Capobianco M., Dette H.H., Lechuga A., Spanhoff R. e Stive M.J.F. (2002) - *A summary of European experience with shore nourishment*. Coastal Engineering, 47: 237-264.
- I.S.R.M. (1979) - *Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties*. International Journal Rock Mechanics, Mining Sci. and Geomechanics Abstr., 16: 141-156.
- I.S.R.M. (1985) - *Suggested methods for determining point load strength*. Commission on Testing Methods, Working Group on Revision of the Point Load Test. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22: 51-60.
- Palmström A. (1995) - *Rmi - a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. PhD thesis, Oslo University, Norway, 400 pp.
- Rete Ferroviaria Italiana (2005) - *La linea Genova-Ventimiglia – Il raddoppio del tratto Andora-San Lorenzo - Le nuove stazioni di Imperia, Diano e Andora*. Stampa xxx, 3/2005 - 1.000.
- Sagri M. (1984) - *Litologia, stratimetria e sedimentologia delle torbiditi di piana di bacino del Flysch di Sanremo (Cretaceo superiore, Liguria Occidentale)*. Mem. Soc. Geol. It., 28: 577-586.

**Manoscritto ricevuto il 28/08/2008, accettato il 17/09/2008.**

## Il Catalogo delle opere di difesa costiera della Regione Emilia-Romagna

Luisa Perini, Samantha Lorito e Lorenzo Calabrese

Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Regione Emilia-Romagna

### Riassunto

Le opere di difesa del litorale emiliano-romagnolo, costruite negli ultimi 60 anni, interessano circa 80 km di costa e hanno l'obiettivo di contrastare l'erosione e di difendere dalle mareggiate le spiagge, le strutture balneari, gli edifici e le infrastrutture urbane. Spesso, tuttavia, la presenza di queste opere costruite senza il supporto di studi adeguati, ha generato problemi ai litorali adiacenti, imponendo nuovi interventi di difesa.

Negli ultimi anni si è quindi ravvisata la necessità di disporre di un archivio informatico delle opere di difesa per l'intera costa regionale, mai creato a causa della frammentazione delle competenze in questo settore (Stato, Regione e Comuni) e della conseguente dispersione delle informazioni. Nell'ambito del progetto EU Cadsealand e della implementazione del Sistema Informativo della Costa da parte del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS), tale archivio informatizzato è stato creato in forma di "catalogo delle opere di difesa e delle opere marittime", i cui principali obiettivi sono: i) fornire alle autorità un quadro completo ed aggiornato dello stato di protezione della costa; ii) valutare, confrontando i rilievi relativi agli anni successivi, l'efficacia delle opere e/o i problemi che esse hanno creato; iii) disporre di un livello informativo indispensabile per l'applicazione della modellistica numerica relativa alla propagazione delle onde e al flusso sedimentario nelle aree costiere.

Considerata la difficoltà di reperire le informazioni progettuali si è deciso di procedere per fasi e di coinvolgere i diversi servizi tecnici regionali competenti.

**Parole chiave:** Sistema Informativo della Costa (SIC), opere di difesa costiera, erosione della costa.

### Abstract

*Coastal defences of the Emilia-Romagna, built in the last 60 years, protect about 80 km of coastline and are intended to contrast the beach erosion and defend urban areas from sea flooding. However, the presence of these works, built without the support of appropriate studies, has created problems for adjacent coasts, imposing further defence interventions. In recent years, the need for an archive of defences for the entire coast, never produced because of the fragmentation of responsibilities in this area (State, Region and Municipalities) and the resulting dispersal of information, has identified. Following the outline of EU project Cadsealand and implementation of Coastal Information System (SIC) by the Geological Seismic and Soil Survey (SGSS), a geodatabase was created in the form of "catalogue of defences and harbours", whose main objectives are: i) to provide a comprehensive and updated status of protection of the coast; ii) to assess the effectiveness of works and/or the*

problems they have created, comparing the analysis related to subsequent years; iii) to have useful digital data for the application of numerical modelling on the propagation of waves and sediment flux in the nearshore. The difficulty of finding the project data of the coastal works has decided to proceed by stages and involve the regional technical services.

**Keywords:** Coastal Information System (SIC), coastal defence works, geodatabase, coastal erosion.

## Introduzione

Il risultato di oltre 60 anni di interventi atti a contrastare i fenomeni erosivi e di ingressione marina che hanno interessato i litorali dell'Emilia Romagna, fa sì che circa 80 dei 130 km di costa sia protetta artificialmente (140 km se si considera lo sviluppo costiero complessivo, inclusi lo scanno di Goro e la freccia litorale di Volano). Tra le Province costiere Ravenna e Ferrara sono caratterizzate da un'estensione di opere intorno al 50 % della sua costa, mentre Rimini e Forlì - Cesena presentano difese costiere a protezione di oltre il 60% del litorale (vedi Tab.1). In molti casi gli interventi sono stati realizzati per contrastare fenomeni erosivi innescati dalla presenza di altre opere a mare, mettendo in evidenza la criticità delle passate politiche di frammentazione delle competenze sulla protezione della costa (Stato, Regione e Comuni) e la mancanza di analisi complete relativamente all'impatto degli interventi stessi sulla dinamica litorale.

**Tabella 1 - Indici strutturali calcolati a livello provinciale relativi all'anno 2005.**

Provincia	Estensione litorale	Estensione opere di difesa artificiali	Estensione difese naturali (duna):	Indice strutturale IS= costa protetta/ lunghezza costa
Ferrara	~ 49,7 km *	~ 28,7 km	~ 18 km	0,6
Ravenna	~ 47,5 km	~ 23,4 km	~ 18,3 km	0,5
Forlì-Cesena	~ 9,4 km	~ 7,2 km	~ 0,2 km	0,8
Rimini	~ 35 km	~ 22,6 km	~ 0,5 km	0,6

\*compresa la linea di riva lagunare e la linea di riva dello Scanno di Goro.

Risultava dunque necessario, per una corretta gestione dei litorali dal rischio di erosione e per la programmazione di nuove strategie di difesa, partire da un'analisi storica degli interventi di difesa che si sono succeduti sul territorio e dei loro effetti sui litorali, *i.e.* la variazione della linea di riva e le modificazioni della spiaggia sommersa. Per condurre simili indagini era, tuttavia, indispensabile disporre di un archivio storico degli interventi che contenesse tutte le informazioni sulla tipologia e sulle caratteristiche strutturali e costruttive delle opere. Un primo archivio cartaceo, era stato prodotto nell'ambito del 'Piano Progettuale per la difesa della costa Adriatica Emiliano-Romagnola', volume VI – Le opere a mare: caratteristiche ed effetti sul litorale (Preti M., 1984). Al fine di aggiornare tale lavoro, ripreso anche nei successivi studi sullo stato del litorale Emiliano-Romagnolo (Idroser, 1996; ARPA-IA, 2000), commissionati dalla Regione Emilia Romagna, si è avviato il progetto 'catalogo informatico delle opere di difesa', sviluppato nell'ambito del progetto europeo CADSEALAND (AA.VV., 2006), concluso a Dicembre 2006, e più in particolare nell'ambito del progetto di Sistema Informativo della Costa (SIC) della Regione Emilia-Romagna (Perini et al., 2007).

Il "catalogo informatizzato in ambiente GIS delle opere di difesa costiera" è stato prodotto principalmente sulla base della fotointerpretazione degli anni 1943-45, 1982, 1998 e 2005.

Successivamente si è impostato un *geodatabase* più completo che è stato implementato grazie al contributo dei Servizi Tecnici Regionali di Ferrara, Ravenna, Forlì-Cesena e Rimini.

Il progetto "catalogo delle opere di difesa" si è posto come ulteriore obiettivo la realizzazione di uno strumento, aggiornabile periodicamente, che fornisse alle autorità competenti i dati sullo stato di protezione della costa ed utilizzabile per l'applicazione della modellistica numerica relativa alla propagazione delle onde e al flusso sedimentario nelle aree costiere.

### **Strumenti e Metodi**

In assenza di un archivio organizzato, anche cartaceo, degli interventi di difesa costiera realizzati in passato, il quadro storico e attuale è stato ricostruito mappando le opere sulla base di fotografie aeree appartenenti a diversi periodi di tempo.

La procedura operativa adottata può essere schematizzata nel modo seguente:

- fotointerpretazione delle strutture rigide riconoscibili sulle foto aeree relative agli anni 1943-'45 - 1982 - 1998 - 2005;
- classificazione delle opere mappate utilizzando come riferimento le indicazioni fornite "dall'Atlante delle spiagge Italiane" del CNR (1985) e confronto con la recente classificazione riportata nell'Atlante delle opere di sistemazione costiera pubblicato da Apat (2007);
- misura dei parametri geometrici dell'opera (lunghezza dell'opera, distanza da riva, ampiezza varchi ecc.) e attribuzione del dato altimetrico alle opere emerse (Volo 2005) mediante confronto con il modello di elevazione digitale Lidar2004;
- predisposizione di un *geodatabase* omogeneo implementabile da parte delle autorità locali competenti con informazioni di natura tecnica sulle singole opere (data di realizzazione, materiali, anno di costruzione, anno di smantellamento ecc.);
- raccolta dei dati costruttivi, disponibili presso i Servizi Tecnici Regionali di Ferrara, Ravenna, Forlì-Cesena e Rimini e verifica del catalogo;
- pubblicazione dei cataloghi in WEB.

### **Fotointerpretazione delle opere di difesa costiera**

Il SGSS ha acquisito in forma digitale la maggior parte delle immagini aeree disponibili per l'area costiera regionale dal 1943 al 2005. Per rendere il prodotto corretto dal punto di vista cartografico, si è proceduto, in una prima fase, alla georeferenziazione, all'ortorettifica e alla mosaicatura delle immagini aeree storiche e recenti, con particolare riferimento al Volo Raf 1943-45, Volo costa 1982, IT2000 (1998) e Volo Costa 2005.

Le foto aeree sono state georeferenziate nel sistema di riferimento adottato dalla regione Emilia-Romagna (ED50 UTM32° falso nord - 4.000.000), ortorettificate e gestite attraverso un idoneo Sistema Informativo Geografico (GIS). La georeferenziazione ha utilizzato come base cartografica la Carta Tecnica Regionale scala 1:5.000; la correzione geometrica è avvenuta mediante l'ausilio del DEM Regionale 5X5 metri. Il metodo di ricampionamento adottato è stato quello della "convoluzione cubica". Nel caso in cui vi erano delle significative variazioni di luminosità e contrasto tra fotogrammi adiacenti sono state eseguite delle operazioni di stretching che hanno omogeneizzato le radiometrie dei fotogrammi da mosaicare. Le singole immagini ortorettificate sono state mosaicate per formare degli ortofotomosaici, tagliati sulla base del territorio rappresentato da un elemento cartografico (sezione) alla scala 1:10.000, il cui contenuto informativo dipende da una dimensione nominale del pixel compresa tra 0.5x0.5 m e 0.7x0.7 m.

Il volo RAF (1943) risulta essere il meno accurato, infatti, le ricognizioni aeree sono state eseguite in diverse giornate in un periodo di tempo che va dall'agosto 1943 al settembre 1944, con modalità di esecuzione differente sia da un punto di vista strumentale sia di quota di volo. Una trattazione esaustiva sulla metodologia e sulle procedure utilizzate nella fase di georeferenziazione

ne e ortorettifica delle foto aeree è stata sviluppata in un recente lavoro disponibile sul sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (Luciani, 2007).

Per ogni ortofotomosaico (1943, 1982, 1998 e 2005) le opere sono state fotointerpretate, direttamente a video, in ambiente GIS vettoriale, utilizzando i prodotti della ESRI in dotazione al SGSS, principalmente ArcGis 9.2 e ArcView 3.2. Le diverse opere sono state mappate in forma poligonale ed acquisite a scala di dettaglio (1:1.000), per garantire una miglior precisione e accuratezza del dato alla scala di restituzione finale 1:5.000.

Le medesime regole fotointerpretative e topologiche sono state applicate nella elaborazione e mappatura delle opere di ogni ortofotomosaico.

Nel caso delle opere emerse, vengono tracciati i limiti della porzione emersa delle opere pseudo-parallele o trasversali alla linea di riva, visibili al momento dello scatto della foto aerea (Fig.1).

Quando le condizioni meteomarine sono ottimali è possibile intravedere anche la porzione sommersa dell'opera, tuttavia si è deciso di non mappare tale limite in quanto le condizioni possono variare su fotogrammi contigui, rendendo discontinuo questo dato.

La risoluzione è variabile a seconda del periodo di appartenenza della foto passando dalla fotointerpretazione a scala indicativa 1:35.000 del volo 1943, alla scala 1:10.000 del volo 2005.



Figura 1 - Opera distaccata emersa. Esempio di mappatura: vengono tracciati i limiti della porzione emersa dell'opera, visibili al momento dello scatto della foto aerea.

Nel caso delle opere soffolte, vengono tracciati i limiti della porzione dell'opera visibile come un'ombra scura sotto il livello dell'acqua al momento dello scatto della foto aerea. Non sempre le opere soffolte sono visibili chiaramente sui fotogrammi, in condizioni di mare mosso, per esempio, spesso vengono confuse con vecchie opere emerse smantellate per erosione. Solo in seguito ad una verifica da parte dei servizi tecnici competenti è stato possibile aggiornare il *geodatabase* attribuendo correttamente il termine soffolte alle sole opere per le quali la sommersione era prevista dal progetto costruttivo, distinguendole quindi dalle opere *sommerse*, per le quali la massima funzionalità era progettata in condizioni di emersione.

### Classificazione delle opere di difesa

Le opere di difesa individuate lungo il litorale regionale sono state classificate seguendo le indicazioni (salvo lievi modifiche) dell'“Atlante delle Spiagge Italiane” (CNR, 1985) e confrontando le tipologie riconosciute lungo il litorale emiliano-romagnolo con la recente classificazione riportata nell'Atlante delle opere di sistemazione costiera pubblicato da Apat (2007).

Fino ad ora sono state mappate esclusivamente le opere di difesa rigida, anche se è in corso il progetto di ampliamento del catalogo agli interventi di ripascimento.



La descrizione delle tipologie di opera di difesa rigida del litorale emiliano romagnolo è la seguente:

- *opera di difesa longitudinale distaccata - emergente*: segmenti di scogliera in massi posti su fondali di circa 3 m, separati da varchi aventi lo scopo di consentire lo scambio di acqua. Essi agiscono sul moto ondoso attraverso fenomeni di dissipazione dell'energia e fenomeni di diffrazione;
- *opera di difesa longitudinale distaccata - soffolta - in massi*: segmenti di scogliera in massi posti su fondali di circa 3 m la cui altezza è limitata all'impatto visivo. La segnalazione avviene attraverso boe luminose;
- *opera di difesa longitudinale distaccata - soffolta - in sacchi*: sono costituite da un allineamento di sacchi in geotessile colmati di sabbia, con dimensione di 2-3 m ciascuno, emergenti dal fondo circa 40 cm. Spesso a sostegno di opere di ripascimento;
- *opera di difesa longitudinale distaccata aderente - soffolta - tubi longard*: guaine di tessuto sintetico riempite con una miscela di sabbia. Si installano parallelamente alla linea di riva a varie profondità (piede duna, battigia, spiaggia sommersa). Possono essere associate anche ad elementi perpendicolari che isolino delle celle, favorendo così la formazione di una spiaggia sospesa. Questa tipologia di opera è ormai abbandonata ed è presente solo nei cataloghi storici;
- *opera di difesa longitudinale interna - argine interno*: sono costituite da un argine in terra, o da un cordone dunoso, rivestiti sul lato a mare con geotessili e rinforzati con una mantellata di massi rocciosi;
- *opera di difesa longitudinale aderente - scogliere radenti*: sono costituite da massi naturali e/o artificiali e poste parallelamente alla linea di riva in corrispondenza della spiaggia emersa. Vengono utilizzate in zone senza particolare pregio ambientale;
- *opera di difesa longitudinale aderente - argini e muri di sponda*: sono strutture compatte e continue, realizzate per difendere il retrospiaggia dall'azione diretta del moto ondoso. Sono costruiti parallelamente alla linea di riva per difendere infrastrutture posizionate vicino al limite naturale della spiaggia;
- *opera di difesa longitudinale aderente - paratie a mare*: sono le palancole in calcestruzzo, ferro o legno. Vengono utilizzate come soluzioni temporanee di emergenza perché hanno breve durata essendo rapidamente scalzate al piede;
- *opera di difesa trasversale (emersa e soffolta) - pennelli*: sono strutture che si estendono dal retrospiaggia alla prima linea dei frangenti di normale mareggiata. Sono realizzati in massi, calcestruzzo ferro o legno e possono essere isolati o far parte di un sistema. L'effetto è quello di intercettare parte del trasporto lungo riva creando un accumulo sul lato sopraflutto;
- *opera di difesa trasversale - tubi longard*: guaine di tessuto sintetico riempite con una miscela di sabbia;
- *opera di difesa mista (emersa e soffolta)*: sono sistemi di difesa costruiti combinando diverse tipologie delle opere sopra descritte. Le più ricorrenti sono formate da pennelli e difese longitudinali distaccate sia soffolte che emerse;
- *infrastrutture minori*: sono opere a mare di piccole dimensioni, costruite con fini diversi da quelli della difesa, che comunque hanno una influenza, anche minima, sulla dinamica costiera.

La Tabella 2 riporta sinteticamente la suddetta classificazione e le definizioni alternative utilizzate nel piano costa RER 96 (in corsivo) e da altre Istruzioni tecniche per la progettazione ed esecuzione delle opere di difesa del Ministero dei lavori pubblici.

### Attribuzione parametri altimetrici e geometrici

La mappatura in ambiente GIS permette di calcolare in automatico alcuni parametri geometrici quali le dimensioni delle opere e di ricavarne altri mediante semplici analisi come la distanza dalla linea di riva o l'ampiezza dei varchi fra opere contigue (Fig. 2).

Un parametro molto importante è la quota delle strutture riferita al livello medio mare. Ciò è stato realizzato utilizzando i dati altimetrici ad alta risoluzione, ottenuti con rilievo lidar (Perini, 2005).

**Tabella 2 - Classificazione delle opere di difesa.**

Posizione rispetto alla linea di riva	Posizione rispetto al livello del mare	Tipologia costruttiva	Definizioni alternative
Difesa longitudinale distaccata (parallela o obliqua)	emergente	Segmenti di scogliera in massi posti su fondali di circa 3 m, separati da varchi.	- Scogliera a mare - Frangiflutti distaccati emergenti
	soffolta	Segmenti di scogliera in massi posti su fondali di circa 3 m, altezza limitata all'impatto visivo	- Scogliera sommersa - Frangiflutti distaccati sommersi
		Allineamento di sacchi in geotessile colmati di sabbia	Frangiflutti in sacchi di sabbia
Difesa longitudinale interna	emergente	Argini in terra	Argini interni
Difesa longitudinale aderente	emergente	Scogliera in massi o gabbioni	Scogliera radente
		Sabbia e/o terra	- Argini e muri di sponda - Dune armate
		Soluzioni temporanee in legno e/o geotessuto	Paratie a mare palancole temporanee
			-
Difesa trasversale (perpendicolare o obliqua)	emergente	Si estendono dal retro spiaggia alla prima linea di frangenti di normale mareggiata e sono costruiti in massi o in legno	Pennelli
	soffolta		Pennelli sommersi Tubi Longard
Difesa mista	emergente		
	soffolta		

In corrispondenza di ciascuna struttura, infatti, è stato tracciato un profilo longitudinale dell'opera, dal quale sono state estratte le quote minima, media e massima, utilizzando come datum altimetrico il livello medio mare - Genova '42.

### Predisposizione di un geodatabase omogeneo

La struttura finale del database è stata discussa e concordata con il servizio Difesa Suolo, della Costa e Bonifica e con i Servizi Tecnici regionali di Ferrara, Ravenna, Forlì-Cesena e Rimini, impegnati nella attività di pianificazione e difesa della costa regionale e contiene le seguenti informazioni:

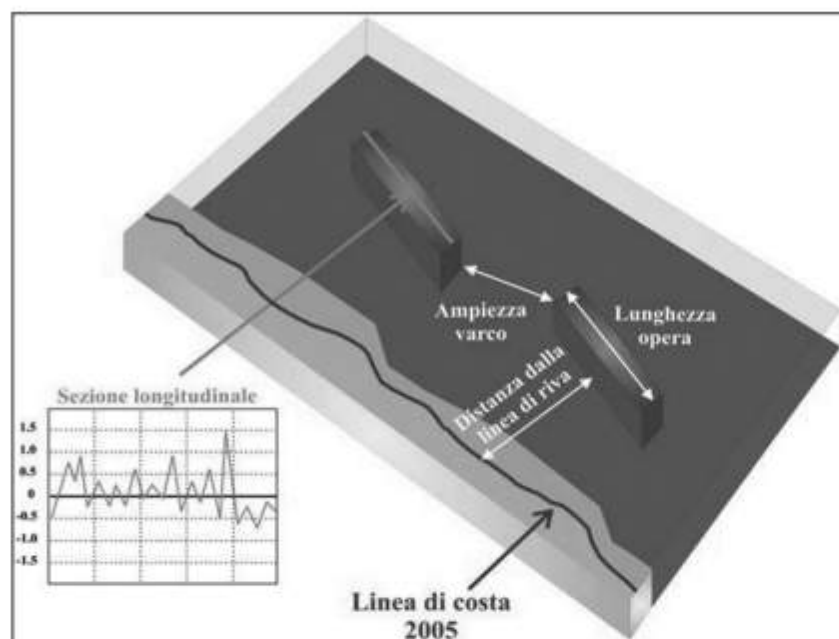


Figura 2 - I parametri calcolati sulla base della fotointerpretazione e/o dei dati lidar sono: i) la dimensione dell'opera; ii) la distanza dalla linea di riva; iii) l'apertura dei varchi; iv) la quota sul livello del mare.

- tipologia di opera;
- emersione o sommersione dell'opera;
- materiale costruttivo;
- anno di realizzazione;
- ente realizzatore;
- eventuali modifiche apportate all'opera;
- anno di smantellamento opera;
- altezza media (m s.l.m.m.);
- altezza minima (m s.l.m.m.);
- altezza massima (m s.l.m.m.);
- lunghezza opera (m);
- ampiezza varco nord (m);
- distanza dalla linea di riva (m) rispetto all'anno di riferimento;
- comune di appartenenza;
- località;
- volo aereo di riferimento per la mappatura.

I servizi tecnici costieri hanno contribuito alla fornitura di alcuni dati costruttivi, quali: anno di realizzazione, ente, materiale etc. ed alla verifica finale delle informazioni inserite.

### **Pubblicazione dei cataloghi mediante WEBGIS**

Attualmente i cataloghi delle opere realizzati sono stati pubblicati sul sito web del mare e della costa predisposto dal SGSS per supportare le azioni di pianificazione e di programmazione della regione in ambito costiero:

([www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito\\_cartografia/web\\_gis\\_costa.htm](http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/web_gis_costa.htm))

Il tema cartografico di riferimento è denominato 'Opere di Difesa', consultabile selezionando l'anno di interesse.

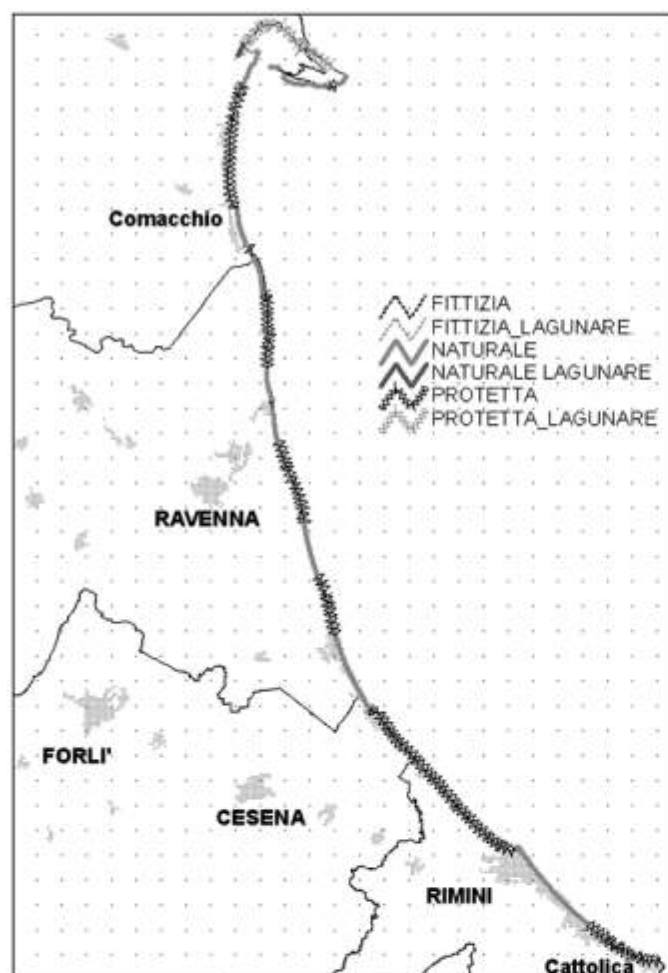


Figura 3 - Suddivisione della linea di costa ricavata dalle immagini del volo RER 2005 nei tratti: *fittizia* - un tratto di costa con varchi che interrompono la linea di riva, in prossimità delle foci fluviali e dei porti; *naturale* - un tratto di costa non protetto da opere di difesa artificiali; *protetta* - un tratto di costa protetto da opere di difesa artificiali ben distinguibili da foto aerea; *lagunare protetta* - ha le caratteristiche di un tratto protetto in ambiente lagunare (Sacca di Goro).

### Applicazioni del catalogo delle opere

Il SGSS ha utilizzato le numerose informazioni contenute nei vari cataloghi delle opere di difesa per approfondire gli studi sullo stato del litorale e sulla dinamica costiera delle spiagge dell'Emilia-Romagna. L'interpretazione e l'elaborazione dei dati in essi contenuti hanno condotto, all'oggi, a due principali risultati: la ricostruzione dell'evoluzione dei sistemi di protezione costiera nel litorale dell'Emilia-Romagna nel periodo 1943-2005 e la valutazione dell'influenza delle opere di difesa sulla morfologia della spiaggia emersa e sommersa.

### *Ricostruzione dell'evoluzione dei sistemi di protezione costiera nel litorale dell'Emilia-Romagna nel periodo 1943-2005*

Il catalogo delle opere di difesa costituisce uno strumento molto importante sia per il controllo dello stato di irrigidimento della costa che per la pianificazione di nuovi interventi.

Ciascun catalogo è stato corredato dei relativi metadati, contenenti importanti informazioni sulle procedure di elaborazione, sulla qualità dei dati e sul contenuto del *file* stesso. I metadati sono stati implementati attraverso il software "City Trek Repository Manager", prodotto dalla CORE su commissione RER. Esso costituisce uno strumento per la creazione di cataloghi evoluti di tutte le banche dati cartografiche e gestionali del Sistema Informativo Regionale. Le specifiche di riferimento sono le ISO 19115 in accordo con le normative dell'Intesa GIS Stato Regioni.

Il catalogo relativo alle opere di difesa mappate sul Volo 2005 è il più completo, contenendo le informazioni tipologiche e strutturali previste dal geodatabase creato e implementato in accordo con i Servizi Tecnici competenti.

I cataloghi relativi agli anni 1943, 1982 e 1998, invece, contengono solo le informazioni inerenti il tipo di opera.

Attraverso le informazioni relative alla distribuzione delle opere costiere, è stata realizzata una classificazione della linea di riva a scala regionale che permette di distinguere le aree protette artificialmente e i litorali naturali (Fig. 3). Il tematismo è interrogabile su WEBGIS selezionando le "linee di riva" corrispondenti agli anni: 1943-'45, 1982, 1998 e 2005.

Uno dei principali scopi per cui il catalogo è stato prodotto è, la ricostruzione della sequenza temporale della variazione delle opere di difesa basata sulle immagini aeree relative agli anni 1943 - 1982 - 1998 - 2005 al fine di comprendere l'efficacia e gli effetti prodotti dalle opere sulla linea di costa.

In questo senso l'uso dello strumento GIS offre un supporto molto efficace, permettendo la visualizzazione contemporanea delle opere presenti in diversi periodi di tempo, l'elaborazione e il confronto con altri tematismi realizzati dal SGSS, *i.e.* linea di riva, geomorfologia costiera, uso del suolo della costa (Fig. 4), per valutare le variazioni della spiaggia e quindi quantificare l'efficacia degli interventi sulla protezione della costa dall'erosione e/o ingressione marina. Di seguito vengono descritti sinteticamente gli interventi di protezione della costa emiliano-romagnola negli anni 1943, 1982, 1998 e 2005.

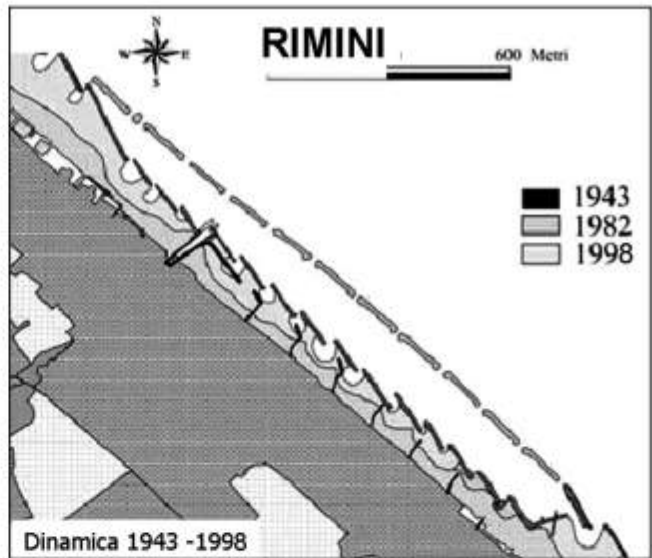
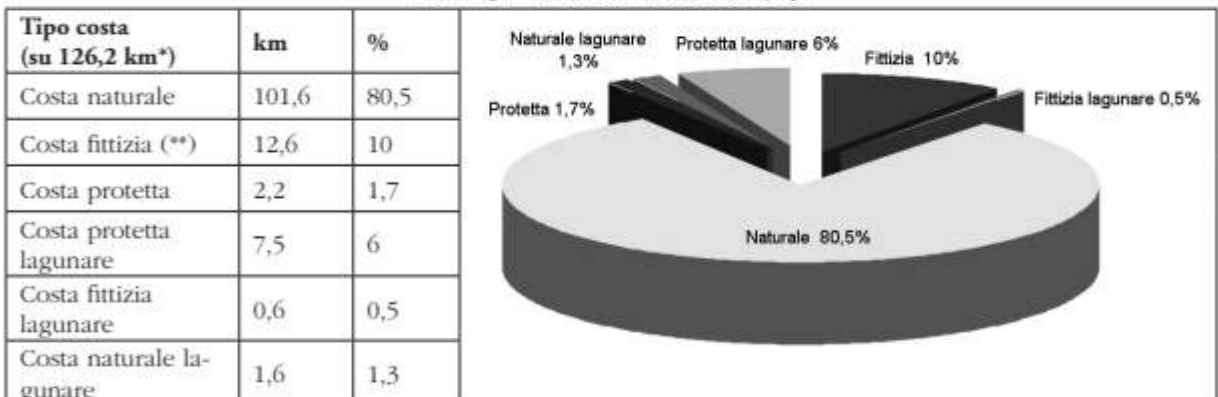


Figura 4 - Evoluzione del sistema di difesa costiera di un paraggio presso Rimini Nord confrontando le foto aeree degli anni 1943, 1982 e 1998. Sono rappresentati anche elementi della geomorfologia costiera, bassofondi (grigio chiaro) e dell'uso del suolo, aree urbane (grigio).

### Opere di difesa costiera 1943

Le prime testimonianze dell'esistenza di opere di difesa sono state individuate sulla base di foto aeree datate 1943-'45 (volo R.A.F.) dalle quali risulta che meno dell' 8% del litorale regionale era protetto con opere di difesa, per lo più costituite da argini in terra dislocati a fronte delle zone bonificate nei pressi dell'abitato di Goro, mentre più dell'80% era rappresentato da costa naturale (Tab. 3a).

Tabella 3a - Natura della costa nel 1943.



(\*) mancano i fotogrammi e la mappatura dello scanno di Goro e di Gorino

(\*\*) come costa fittizia è stato classificato un tratto di litorale ferrarese, lungo circa 4.8 km, dove mancano i fotogrammi del volo RAF. Si ritiene plausibile che tale tratto sia costituito da costa naturale come si evince dalle immagini del volo GAI 1955.

Le opere di difesa dal mare e di difesa portuali all'epoca presenti,visibili e mappabili dal volo RAF, sono sintetizzate nella tabella seguente (Tab. 3b).



Nel complesso, la situazione della costa nell'anno 1943 può considerarsi diffusamente naturale; pertanto, l'assetto geomorfologico della spiaggia osservato in questo volo è legato ai soli processi naturali morfodinamici ed è la testimonianza dell'ambiente costiero prima della costruzione massiccia delle opere di difesa.

Tabella 3b - Le opere di difesa rigida nel 1943.

Classe-OPERA	Stato	Tipologia	N° elementi mappati
Difesa longitudinale distaccata	emersa	Scogliera in massi	3
Difesa longitudinale aderente	emersa	Scogliera in massi	1
Argine interno (lagunare)	emersa	Argine in terra	6
Difesa mista	emersa	Pennello/scogliera	8
Difesa trasversale	emersa	Pennelli	10
Opere portuali	emersa	Moli/dighe	15
Infrastrutture minori	emersa	Pontili in legno/poltruso	1
Foce armata	emersa	Argini e moli	14
<b>Totale poligoni mappati</b>			<b>58</b>

### Opere di difesa 1982

Il catalogo opere 1982 mette in evidenza una situazione completamente mutata (Tab. 4a e 4b). La costa naturale è diminuita sensibilmente, circa del 50%, poiché, soprattutto nel decennio 1970-'80 sono state erette numerose opere di difesa costiera, la maggior parte delle quali rappresentate da 'Difese longitudinali distaccate', realizzate come scogliere emerse in massi e pietrame generalmente calcareo.

Tabella 4a - Natura della costa nel 1982.

Tipo costa (su 138,3 km*)	km	%
Costa naturale	70	50,6
Costa fittizia	6	4,3
Costa protetta	49,1	35,6
Costa protetta lagunare	10,5	7,6
Costa fittizia lagunare	2,6	1,9

(\*) scanno di Goro e spit inclusi.

La costa protetta è infatti sensibilmente aumentata passando dall' 7,6% del 1943 al 43,2%. Le opere mappate da fotointerpretazione sono decisamente più numerose, con netta dominanza delle difese longitudinali distaccate (da 3 nel 1943 a 313 nel 1982). Da segnalare la comparsa di numerose opere soffolte nella zona dello scanno di Goro, non più mantenute attive negli anni successivi (1998 e 2005).

Tabella 4b - Le opere di difesa rigida nel 1982.

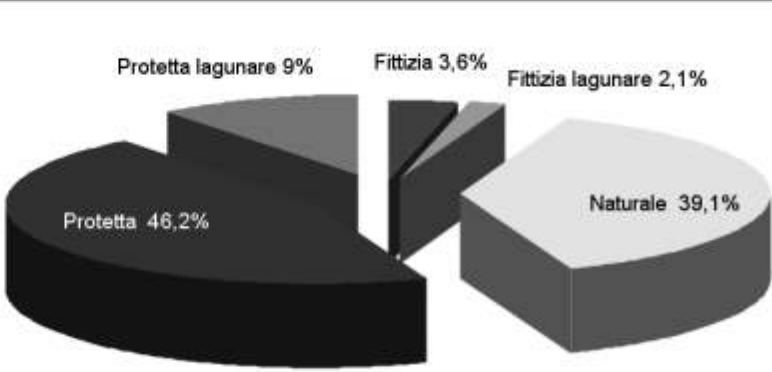
Classe-OPERA	Stato	Tipologia	N° elementi mappati
Difesa longitudinale distaccata	emersa	Scogliere in massi	313
	soffolta	Scogliere in massi, sacchi di sabbia, tubi Longard	1
Difesa longitudinale aderente	emersa	Scogliere in massi	18
	soffolte	Scogliere in massi	3
Argine interno	emersa	Argine in terra o sabbia	8
Difesa trasversale	emersa	Pennelli, scogliere a protezione dei moli	69
	soffolte	Pennelli	40
Difesa mista	soffolte	Scogliere/pennelli, sacchi in sabbia	38
	emersa	Scogliere/pennelli	0
Opere portuali	emersa	Moli/dighe	30
Infrastrutture minori	emersa	Pontili in legno/poltruso	5
Foce armata	emersa	Argini e moli	17
<b>Totale poligoni mappati</b>			<b>542</b>

### Opere di difesa 1998

Il catalogo opere 1998 (volo IT2000) rivela un ulteriore aumento della costa protetta di circa il 10% (Tab. 5a). Aumentano ulteriormente le 'Difese longitudinali distaccate emerse' con l'introduzione della medesima tipologia di opere in versione sommersa (Difese longitudinali distaccate soffolte), costruite per arginare i gravi problemi ambientali insorti nel tempo nelle aree di retro scogliera (Tab. 5b).

Tabella 5a - Natura della costa nel 1998.

Tipo costa (su 140.5 km*)	km	%
Costa naturale	55	39.1
Costa fittizia	5	3.6
Costa protetta	64.8	46.2
Costa protetta lagunare	12.7	9
Costa fittizia lagunare	2.9	2.1



(\*) scanno di Goro e spit inclusi di maggior estensione.

Tabella 5b - Le opere di difesa rigida nel 1998.

Classe-OPERA	Stato	Tipologia	N° elementi mappati
Difesa longitudinale distaccata	emersa	Scogliere in massi	346
	soffolta	Scogliere in massi, sacchi di sabbia, tubi Longard	3
Difesa longitudinale aderente	emersa	Scogliere in massi	32
Argine interno	emersa	Argine in terra o sabbia	10
Difesa trasversale	emersa	Pennelli, scogliere a protezione dei moli	98
	soffolte	Pennelli	22
Difesa mista	soffolte	Scogliere/pennelli	64
	emersa	Scogliere/pennelli	2
Opere portuali	emersa	Moli/dighe	38
Infrastrutture minori	emersa	Pontili in legno/poltruso	19
Foce armata	emersa	Argini e moli	23
<b>Totale poligoni mappati</b>			<b>657</b>

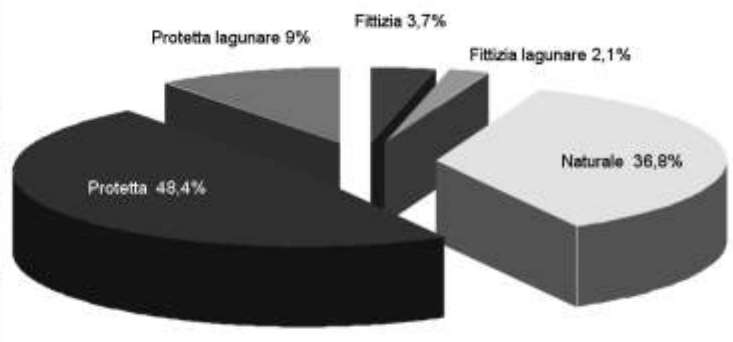
### Opere di difesa 2005

Nel 2005 la costa protetta aumenta ulteriormente, di circa il 2%, in soli 5 anni, e diminuisce la costa naturale che raggiunge il valore storicamente più basso pari a circa il 36% (Tab. 6a).

Il catalogo opere 2005, come osservato in precedenza, è il più completo e dettagliato poiché deriva dalla fotointerpretazione di un volo di estremo dettaglio, è stato collaudato con i servizi tecnici e comprovato da osservazioni in campo. Per tale motivo risulta sensibilmente aumentato il numero di difese trasversali, includendo in tale categoria le scogliere realizzate a difesa delle aree portuali (Tab. 6b).

Tabella 6a - Natura della costa nel 2005.

Tipo costa (su 139,5 km*)	km	%
Costa naturale	51.3	36.8
Costa fittizia	5.2	3.7
Costa protetta	67.4	48.4
Costa protetta lagunare	12.6	9
Costa fittizia lagunare	2.9	2.1



(\*) scanno di Goro e spit inclusi.

Tabella 6b - Le opere di difesa rigida nel 2005.

Classe-OPERA	Stato	Tipologia	N° elementi mappati
Difesa longitudinale distaccata	emersa	Scogliere in massi	335
	soffolta	Scogliere in massi, sacchi di sabbia, tubi Longard	25
Difesa longitudinale aderente	emersa	Scogliere in massi	37
Argine interno	emersa	Argine in terra o sabbia	13
Difesa trasversale	emersa	Pennelli, scogliere in massi e scogliere a protezione dei moli	141
	soffolte	Pennelli	8
Difesa mista	soffolte	Scogliere/pennelli	38
	emersa	Scogliere/pennelli	14
Opere portuali	emersa	Moli/dighe	42
Infrastrutture minori	emersa	Pontili in legno/poltruso	24
Foce armata	emersa	Argini e moli	28
Residui di opere	soffolte	massi, sacchi di sabbia	14
<b>Totale poligoni mappati</b>			<b>719</b>

#### *Valutazione dell'influenza delle opere sulla morfologia della spiaggia emersa e sommersa*

La presenza delle opere di difesa influisce sensibilmente sulla morfologia delle spiagge, nella parte emersa e in quella sommersa, infatti, la costruzione di una struttura rigida modifica profondamente l'equilibrio precedente ed innesca nuove dinamiche costiere che producono diverse configurazioni.

Le principali evidenze dell'impatto delle opere di difesa sulla spiaggia sono sintetizzabili nei casi qui di seguito riportati.

*In presenza di opere trasversali alla costa - moli (Fig. 5a) e pennelli (Fig. 5b):*

- la linea di riva passa da una forma rettilinea ad una geometria a "dente di sega"; si osserva l'accrescimento asimmetrico della spiaggia, si individua in questo modo il lato sottoflutto, dove avviene arretramento della linea di riva, e il lato sopraflutto dove si osserva invece accrescimento. Su questa base è quindi possibile definire la direzione predominante del flusso sedimentario lungo costa, che, nella maggioranza dei casi lungo il litorale della RER è diretto da sud verso nord;
- nel caso dei pennelli è stato osservato che il contrasto che oppongono all'erosione della spiaggia ha una efficienza apparente o transitoria (inferiore ai dieci anni) e divengono inefficaci nel tempo se ad essi non vengono associate altre tipologie di difesa (ad esempio scogliere o barriere soffolte). La presenza dei moli ha invece un effetto durevole, probabilmente a causa dell'estensione della struttura generalmente oltre ai limiti del trasporto lungo costa della sabbia; esso può essere molto importante e si osservano differenze nell'ampiezza della spiaggia emersa di alcune centinaia di metri tra i due lati delle strutture.

*In presenza di opere longitudinali distaccate (scogliere):*

- nel tratto di mare riparato da queste opere l'energia del moto ondoso è minore e si possono depositare le sabbie trasportate dal flusso litoraneo, formando estesi bassofondi e le tipiche morfologie a tombolo (Fig. 6); la spiaggia emersa è generalmente stabile con locali variazioni di accrescimento e di arretramento;

- sottoflutto (spesso al margine nord dei sistemi di scogliera) è quasi sempre presente un tratto di spiaggia più arretrato, dove si manifesta una marcata erosione ("hot spot" erosionali);
- nella spiaggia sommersa, in corrispondenza dei varchi è frequente la formazione di truogoli talora profondi oltre un metro rispetto il fondale circostante;

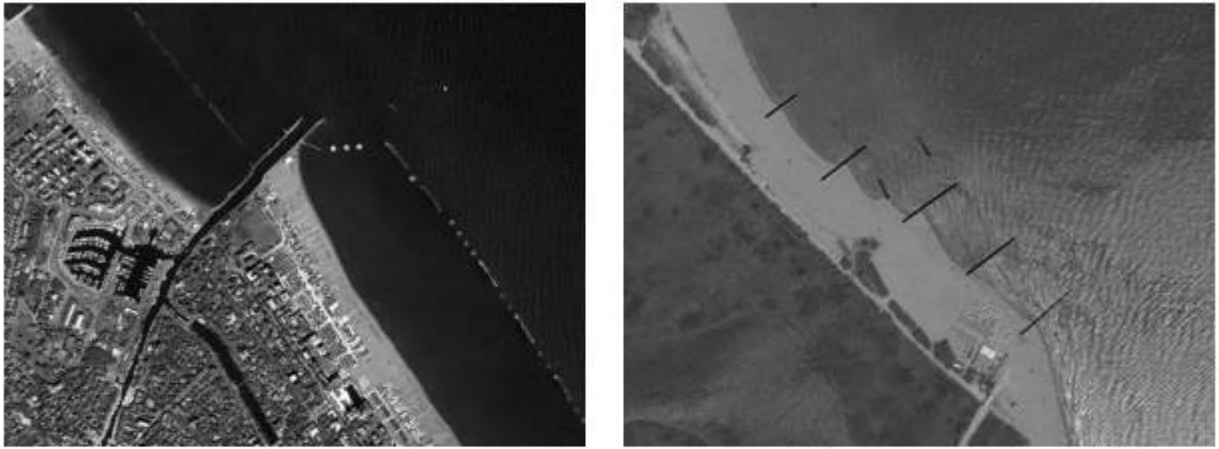


Figura 5 - Strutture trasversali: forte accrescimento della spiaggia nel lato sopraflutto dell'opera e sensibile arretramento della parte sottoflutto; a- effetto del porto-canale di Cesenatico; b- effetto pennelli Lido di Spina sud. (Volo Costa RER 2005).

- il lato a mare (esterno) delle strutture è molto spesso caratterizzato da un sensibile approfondimento dei fondali e il profilo completo della spiaggia è tipicamente "a gradino" (Fig 7). Il dislivello che si registra tra il lato interno e quello esterno è anche superiore al metro e nei fondali esterni generalmente non si osservano barre di frangimento longitudinali. Questo fenomeno origina problemi di stabilità all'opera.

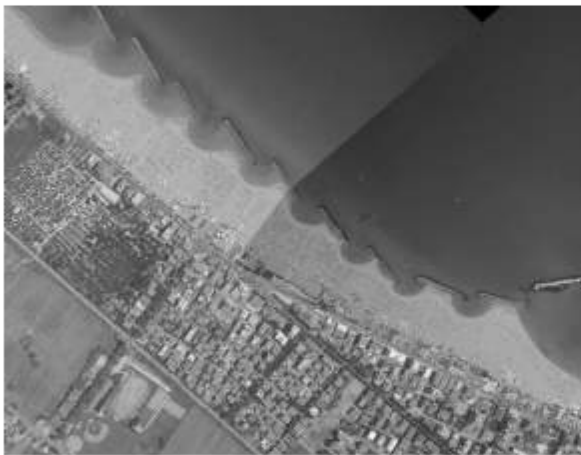
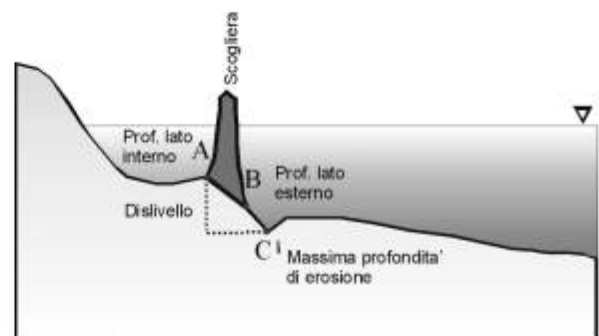


Figura 6 - Accrescimento della spiaggia e formazione dei tomboli a tergo di opere longitudinali distaccate emerse (Volo Costa RER 2005).

Figura 7 - Profilo batimetrico in corrispondenza di opere longitudinali distaccate emerse. La geometria è "a gradino" con possibili approfondimenti al piede della struttura (escavazioni).



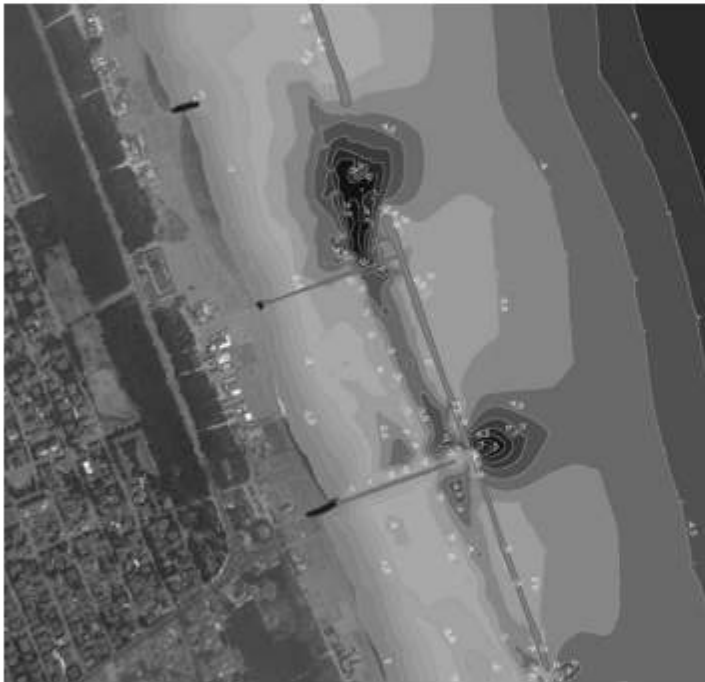


*In presenza di opere longitudinali aderenti - scogliere, argini, muri e paratie:*

- brusco approfondimento del profilo batimetrico immediatamente al piede della struttura e presenza di escavazioni e depositi, prodotti dai processi legati alla riflessione delle onde;
- generale assenza di barre di frangimento *s.s.*, o rare barre longitudinali irregolari ed ondulate.

*In presenza di opere di difesa mista di tipo "a celle" create dalla combinazione di opere trasversali (emerse o soffolte) e opere longitudinali distaccate, (Fig. 8), generalmente soffolte (recentemente adottate in via sperimentale in Emilia-Romagna) si osservano configurazioni simili a quelle dei sistemi di scogliera distaccata (si veda sopra), e in particolare:*

- in prossimità dei varchi di comunicazione tra la cella e il mare aperto si individuano delle escavazioni profonde, che raggiungono profondità massime di circa -7 m, con dislivelli rispetto al fondale circostante superiori ai 4 m. La forma delle depressioni è generalmente asimmetrica (con maggiore sviluppo nel lato verso mare), e la loro estensione longitudinale è di circa 100-200 m; queste strutture sono collegabili a intense correnti di ritorno a seguito di episodi di mareggiata, amplificate dalla struttura semichiusa della cella.



**Figura 8 - Difesa mista "a celle": truogoli (grigio scuro-nero) del fondale prodotti dalla corrente di reflusso in corrispondenza dei varchi interposti tra due scogliere attigue. (Volo Costa RER 2005 e DTM batimetrico).**

Uno dei numerosi esempi del rapporto tra evoluzione delle opere e dinamica costiera in aree critiche è rappresentato dalla foce del Canale Destra Reno, presso Casal Borsetti.

Considerando l'evoluzione di questo tratto costiero (Fig. 9), si può osservare che la linea di riva presso Casal Borsetti ha avuto una tendenza "fuori sequenza", facilmente attribuibile alla presenza del sistema di difesa artificiale. Le curva di variazione della linea di riva dal 1943 al 1954 nel tratto compreso tra la foce del F. Lamone e la foce del F. Reno mostra una progressiva tendenza all'arretramento, con una forte accentuazione in corrispondenza della foce del F. Reno. Negli anni successivi, fino al 1982, questa tendenza è osservabile ancora su gran parte del tratto costiero (linea a trattini), mentre in corrispondenza di Casal Borsetti è evidente un picco di avanzamento in chiara controtendenza (linea a tratti e punti, 1943-1977) che successivamente si stabilizza (dal 1982 in avanti). È significativo il fatto che il sistema di difesa di Casal Borsetti sia presente già nei fotogrammi del volo del 1977.

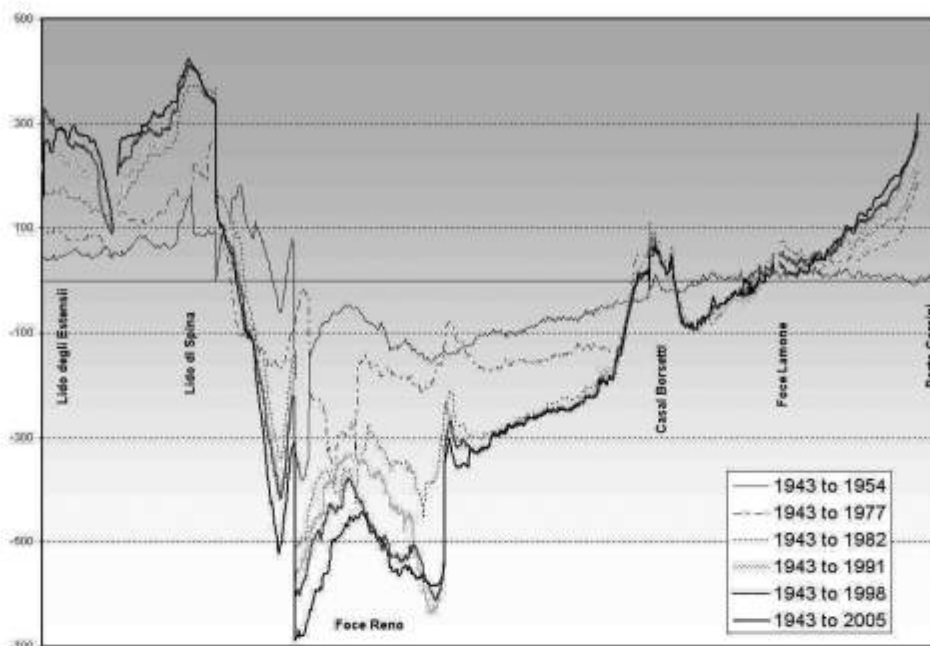


Figura 9 - Variazione della linea di riva dal 1943 al 2005 nel tratto costiero tra Porto Corsini e Lido degli Estensi; si osserva l'influenza locale del sistema di difesa di Casal Borsetti sull'andamento regionale.

Nel particolare si osserva che nel 1943 (catalogo su volo RAF 1943) la foce era circa rettilinea e delimitata da una spiaggia molto ridotta in corrispondenza dell'abitato. La successiva costruzione del sistema di opere di difesa tra gli anni '70 e '80 (catalogo 1982), ha prodotto un sensibile avanzamento della spiaggia protetta e l'arretramento delle aree adiacenti ("hot spot" erosionali). In conseguenza di ciò negli anni '90 è stato eretto un sistema di opere a difesa dei litorali a sud della foce, come si osserva in Figura 10 relativa all'anno 2005.

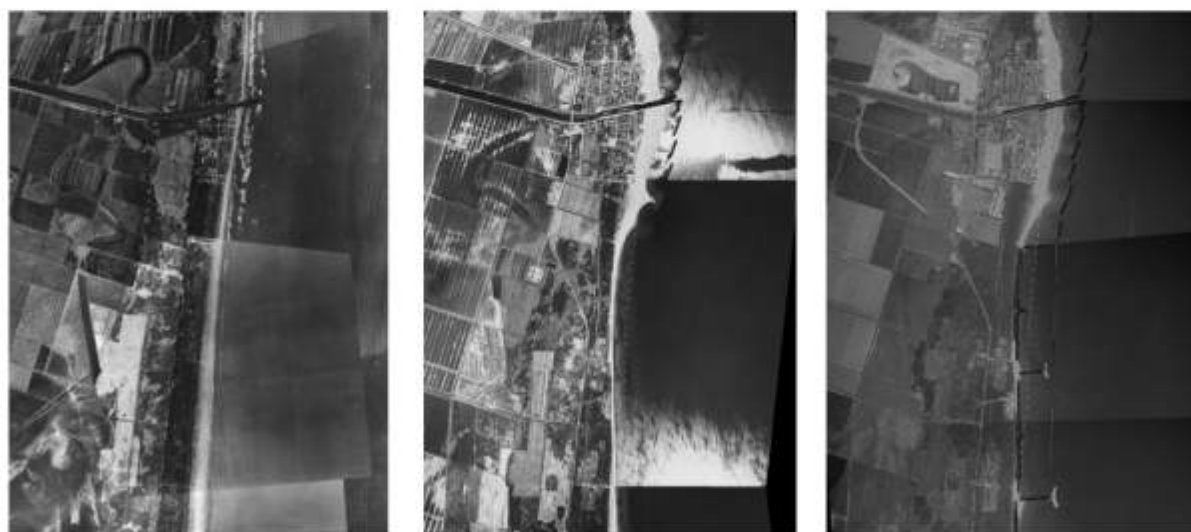


Figura 10 - Immagini in sequenza, da sinistra a destra: volo RAF 1943, volo RER 1982 e volo RER 2005. Evoluzione del litorale in corrispondenza di Casal Borsetti; si può apprezzare l'espansione dei sistemi di difesa artificiale nel tempo e la loro influenza sulla spiaggia emersa: accrescimento e stabilizzazione in corrispondenza delle scogliere ed arretramento nel tratto adiacente verso sud, stabilizzato nel 2005 con un sistema di difesa misto.

## Conclusioni

Il Catalogo delle Opere di Difesa e delle Opere Marittime è uno dei prodotti più importanti realizzati grazie alla disponibilità di nuovi dati acquisiti ed elaborati nell'ambito del Sistema Informativo della Costa (Perini et al., 2005). Tale strumento offre, infatti, un nuovo approccio alla gestione della fascia costiera emiliano-romagnola, che si esprime nelle nuove metodologie di raccolta, gestione ed analisi dei dati sfruttando le tecnologie GIS.

Il progetto del Catalogo delle Opere di Difesa e delle Opere Marittime è stato concepito a fronte della mancanza di un archivio di informazioni organizzate sulle strutture di protezione artificiale erette a difesa delle spiagge e delle aree portuali dell'Emilia-Romagna, che potesse essere utilizzato dalla Regione e dagli enti locali (Provincia, Comuni) ai fini della pianificazione di nuove strategie di difesa e della progettazione ingegneristica degli interventi.

Il Catalogo delle Opere di Difesa e delle Opere Marittime, fornisce una chiara conoscenza sullo stato di protezione del litorale e sulla tipologia delle singole opere offrendo un insieme di informazioni di tipo geografico, geometrico e strutturale utilizzabili per la modellazione del moto ondoso e del flusso sedimentario sotto costa.

La costruzione del Catalogo è sintetizzabile in tre fasi principali: predisposizione di un *geodatabase* aggiornabile in cui sono contenute le caratteristiche delle opere (spaziali e descrittive), cartografia delle opere attraverso foto-interpretazione, in ambiente GIS, delle riprese aeree degli anni 1943, 1982 1998 e 2005 e, per questo ultimo anno, integrazione degli attributi con i dati costruttivi forniti dai servizi tecnici che operano sulla costa.

L'analisi dello stato di protezione della costa in anni differenti ha consentito di osservare e quantificare i vari stadi dell'"irrigidimento" del litorale emiliano-romagnolo. L'evoluzione dei sistemi di difesa rigida è stata anche confrontata con le modificazioni della geomorfologia costiera ed è stato possibile valutare l'impatto delle difese sul litorale negli ultimi 60 anni, con particolare attenzione alle interazioni tra opere e variazione della linea di riva.

L'accesso per gli utenti ai dati del Catalogo delle Opere di Difesa e delle Opere Marittime è possibile attraverso un webgis già operante

([www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito\\_cartografia/web\\_gis\\_costa.htm](http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/web_gis_costa.htm)).

## Ringraziamenti

Si ringraziano per i contributi alle diverse fasi del lavoro: Raffaele Pignone (Responsabile Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli), Ubaldo Cibin, Manuela Gardelli, Michele Montaguti, Paolo Luciani (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli), Maurizio Farina (Servizio Tecnico Bacino Po di Volano), Franco Mastromarco (Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli). Si ringraziano il Servizio Aerofototeca dell'Istituto Beni Culturali di Roma che ci ha fornito i fotogrammi del Volo RAF 1943-45, e la Compagnia Generale delle Riprese aeree di Parma che ha realizzato i voli aerei per conto della Regione Emilia-Romagna. Si ringrazia inoltre l'ing. Mentino Preti di ARPA-IA per le informazioni fornite.

## Bibliografia

- AA. VV. (2006) - *Analysis of correlation between coast evolution and meteo-marine climatology*. Technical report (June 2006). CADSEALAND WP04: Integrated informative system to support protection strategies Deliverable 4.5, 115 pp.
- APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente (2007) - *Atlante delle opere di sistemazione costiera*. Manuale e Linee guida 44/2007.
- ARPA - Regione Emilia-Romagna (2002) - *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2000*. I Quaderni di Arpa. Bologna.
- Consiglio Nazionale della Ricerca, (1985) - *Atlante delle Spiagge Italiane*. Fogli 99-Comacchio, 89-Ravenna, 100-Forlì, 101-Rimini, 109-Pesaro.

- Idroser - Regione Emilia-Romagna (1996) - *Progetto di Piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale del litorale della regione emilia-romagna*. Relazione generale, pp. 365.
- Luciani P. (2007) - *Ortofotopiani della fascia costiera della Regione Emilia-Romagna alla scala nominale 1:10.000*. Rapporto Interno - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, RER, disponibile in [www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito\\_cartografia/web\\_gis\\_costa.htm](http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/web_gis_costa.htm)
- Perini L. (2005) - *Rilievo della Fascia costiera Emiliano-Romagnola con sistema Lidar aerotrasportato*. Relazione di attività - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, RER, disponibile in: [www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito\\_cartografia/web\\_gis\\_costa.htm](http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/web_gis_costa.htm)
- Perini L., Calabrese L., Cibir U., Lorito S., Luciani P. (2007) - *Il Sistema Informativo della Costa e i prodotti cartografici di supporto agli studi e alle strategie di difesa*. In "Ambiente e Territorio" n. 127. Terzo Forum Nazionale. Pianificazione e tutela del territorio costiero. Questioni, metodi, esperienze a confronto, pp.71-88.
- Preti M., (1984) - *Piano progettuale per la difesa della costa adriatica Emiliano Romagnola*. Volume VI, le opere a mare: caratteristiche ed effetti sul litorale. Relazione tecnica Idroser S.p.A., Bologna, Settembre 1984.

**Contributo tecnico ricevuto il 8/10/2008.**

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

Serena Ferri<sup>1</sup>, Filippo Pelliccia<sup>2</sup>,  
Enzo Pranzini<sup>1</sup>, Maria Grazia Rizzo<sup>1</sup> e Giovanni Vitale<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Geo.Coste s.r.l., Via Ugo Corsi, 19 - 50100 Firenze

### Riassunto

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

Tra il Maggio ed il Giugno 2006 è stato oggetto di un ripascimento artificiale non protetto di circa 71.000 m<sup>3</sup> di materiale proveniente da una cassa di espansione del Fiume Po, caratterizzato da dimensioni medie di 0.37 mm a fronte di un sedimento nativo di 0.5 mm.

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

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

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

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

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

### Abstract

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

*Between May and June 2006, an unprotected beach nourishment project was carried out with 71.000 m<sup>3</sup> of medium*



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

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

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

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

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

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

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

## Introduzione

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

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

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

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

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

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

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

**L'area di studio**

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

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



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

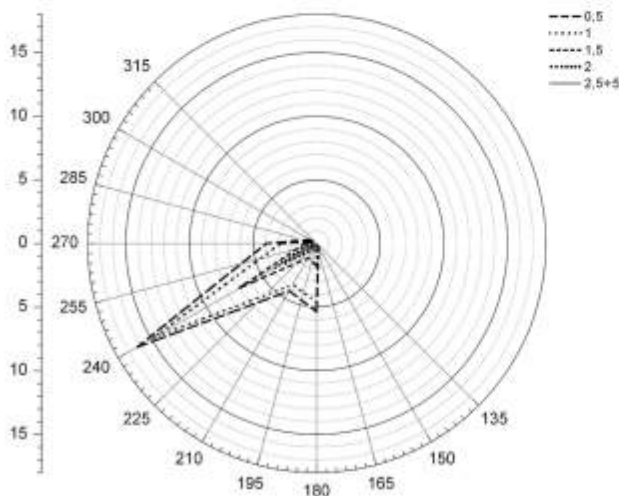


Figura 2 - Distribuzione direzionale del moto ondoso. La ridotta scala di stampa non permette di discriminare le frequenze di  $H_s$  comprese fra 2.5 e 5.0 m (dati ECMWF elaborati da DEAM, 2007).

Dalla Figura 2, che riporta la distribuzione direzionale del moto ondoso, si nota come la direzione intorno ai 240°N sia quella da cui provengono le mareggiate più frequenti e più intense. Sulla base di questi dati è stato valutato in 84.000 m<sup>3</sup>/anno il trasporto netto lungo costa immediatamente a sud della foce del Magra, ed in 62.000 m<sup>3</sup>/anno, sempre verso sud, all'altezza di Marina di Massa, subito a sud del Porto di Marina di Carrara.

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

Il trasporto solido del Fiume Magra, che ha un corso lungo 62 km ed un bacino idrografico di 1693 km<sup>2</sup>, è stato stimato in 632.000 t/anno (351.000 m<sup>3</sup>/a) da Cavazza, nel 1984, ma valutazioni più recenti indicano un valore di circa 125.000 m<sup>3</sup>/anno per quanto riguarda il trasporto in sospensione e 8.900 m<sup>3</sup>/anno sul fondo (Rinaldi, 2005).

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

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

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

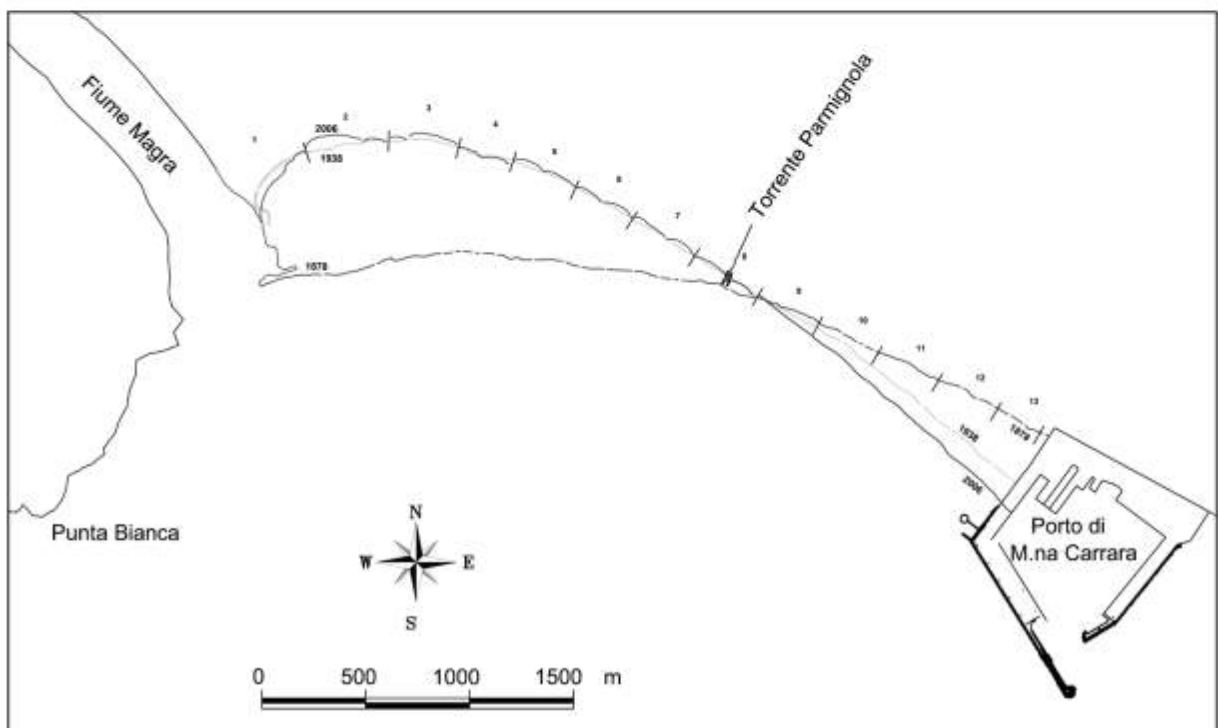


Figura 3 - Variazione della linea di riva sul lungo periodo e delimitazione dei 13 settori nei quali è stato suddiviso il litorale per lo studio della sua evoluzione dal 1878 al 2006.

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

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

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

### Il progetto

Il progetto, realizzato in due lotti, si basa sul ripascimento artificiale per un volume di 81.000 m<sup>3</sup> di sabbia versata sul tratto di circa 300 m posto a sud della foce del Torrente Parmignola (settore n. 9) e nella modifica della geometria dei pennelli di foce.

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



Figura 4 - Stoccaggio del materiale sulla spiaggia.

- il 25 Gennaio 2006 è iniziato lo stoccaggio della sabbia nell'area di cantiere, posta sulla spiaggia ma non in contatto con il mare (Fig. 4);
- il 15 Febbraio, dopo che l'ARPAT (Agenzia Regionale per l'Ambiente della Toscana) aveva verificato la compatibilità ambientale di un primo lotto di 5.000 m<sup>3</sup> di sabbia, è iniziato lo stendimento (Fig. 5), che è proseguito fino al 15 di Maggio 2006, sempre dopo la verifica di analoghi volumi di sabbia.



Figura 5 - Stendimento del materiale di ripascimento.

La sabbia, per complessivi 71.000 m<sup>3</sup> (240 m<sup>3</sup> per metro di costa), è stata distribuita in modo uniforme sulla parte emersa della spiaggia, conferendo alla battigia una maggiore pendenza rispetto a quella che caratterizzava il profilo pre-ripascimento.

Il secondo lotto, consistente nel versamento dei rimanenti 10.000 m<sup>3</sup> di sabbia, è stato realizzato fra il Dicembre 2007 e il Febbraio 2008, periodo non preso in considerazione in questo lavoro. I materiali di ripascimento provengono da una cassa di espansione del Fiume Po, ubicata a Bre-scello, in Emilia Romagna e sono costituiti da sabbie di dimensioni medie (Mz) pari a 1.45 phi (0.37 mm) e con una Classazione ( $\sigma_1$ ) di 0.67 phi (Tabella 2).

Si tratta di sedimenti leggermente più fini e meglio classati delle sabbie native, il cui campione composito ha un valore di Mz pari a 0.97 phi ( 0.51 mm) e di  $\sigma_1$  pari a 1.24 phi. Includendo nel composito anche i sedimenti di step le differenze si fanno più rilevanti.

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

	Mz (phi)	Mz (mm)	$\sigma_1$ (phi)
<b>Nativo di battigia e spiaggia emersa</b>	0.97	0.51	1.24
<b>Nativo di battigia, spiaggia emersa e step</b>	0.17	0.89	1.81
<b>Ripascimento</b>	1.45	0.37	0.67

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



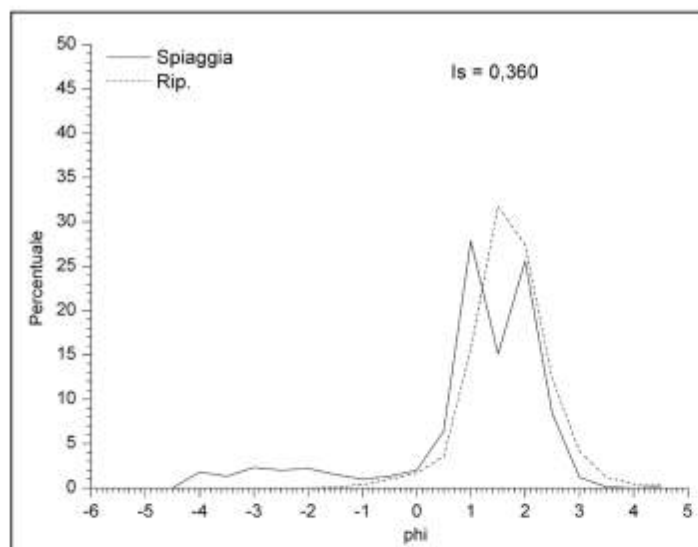


Figura 6a - Confronto fra le distribuzioni granulometriche del campione composito di ripascimento e del campione composito di spiaggia senza i campioni di *step*. In alto sono riportati i valori dell'Indice di stabilità ( $I_s$ ).

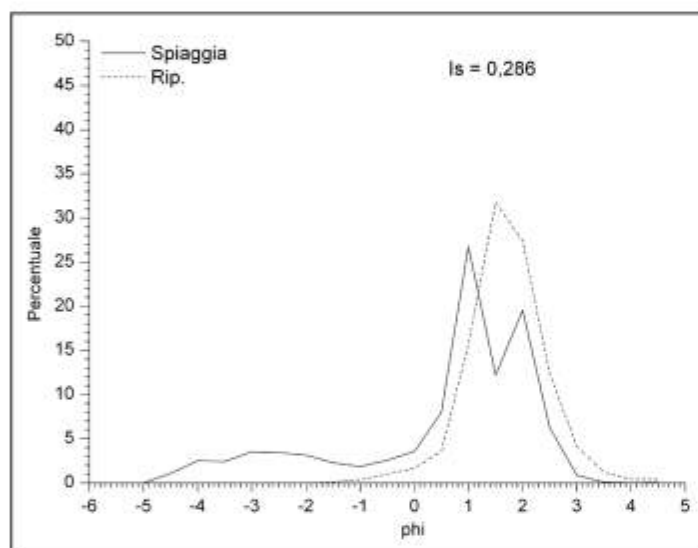


Figura 6b - Confronto fra le distribuzioni granulometriche del campione composito di ripascimento e del campione composito di spiaggia con i campioni di *step*. In alto sono riportati i valori dell'Indice di stabilità ( $I_s$ ).

Il calcolo dell'Indice di stabilità (Pranzini, 1999) porta ad un valore di 0,360, che scende a 0,286 nel caso in cui si prendano in considerazione anche i campioni di *step* per costituire il composito del materiale nativo. E' un indice significativamente più basso di quello 0,500 che caratterizza i materiali di ripascimento con identica distribuzione granulometrica dei sedimenti nativi.

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

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

### Materiali e metodi

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

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

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

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

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

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

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

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

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

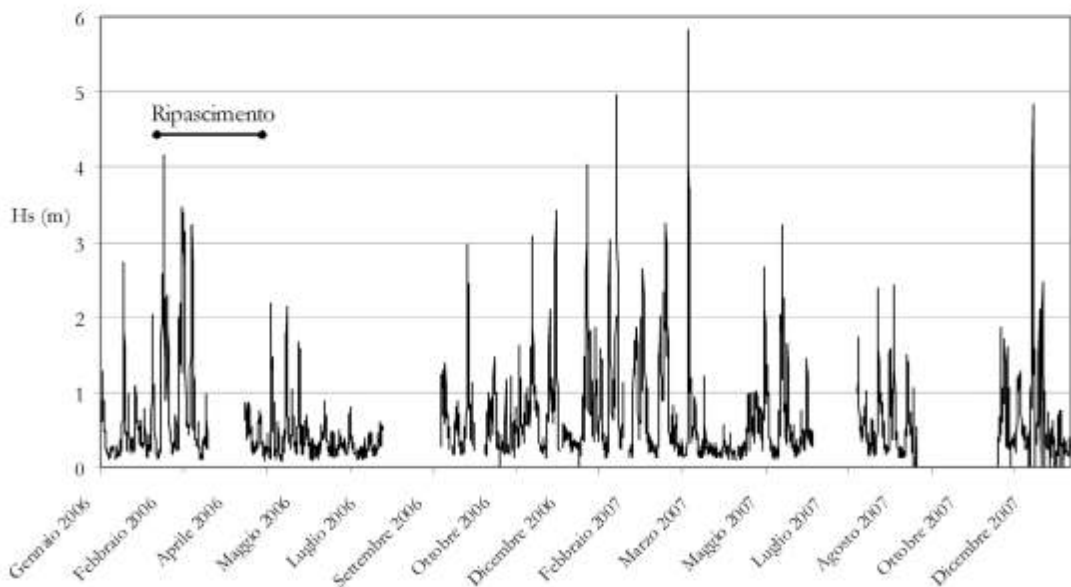


Figura 7 - Altezza d'onda significativa (Hs) registrata dall'ondametro posto su di un fondale di 14 m davanti al porto di Marina di Carrara (dati forniti dall'Autorità Portuale di Marina di Carrara).

### Evoluzione della linea di riva

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

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

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

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

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

#### *Gennaio 2006 - Maggio 2006*

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

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

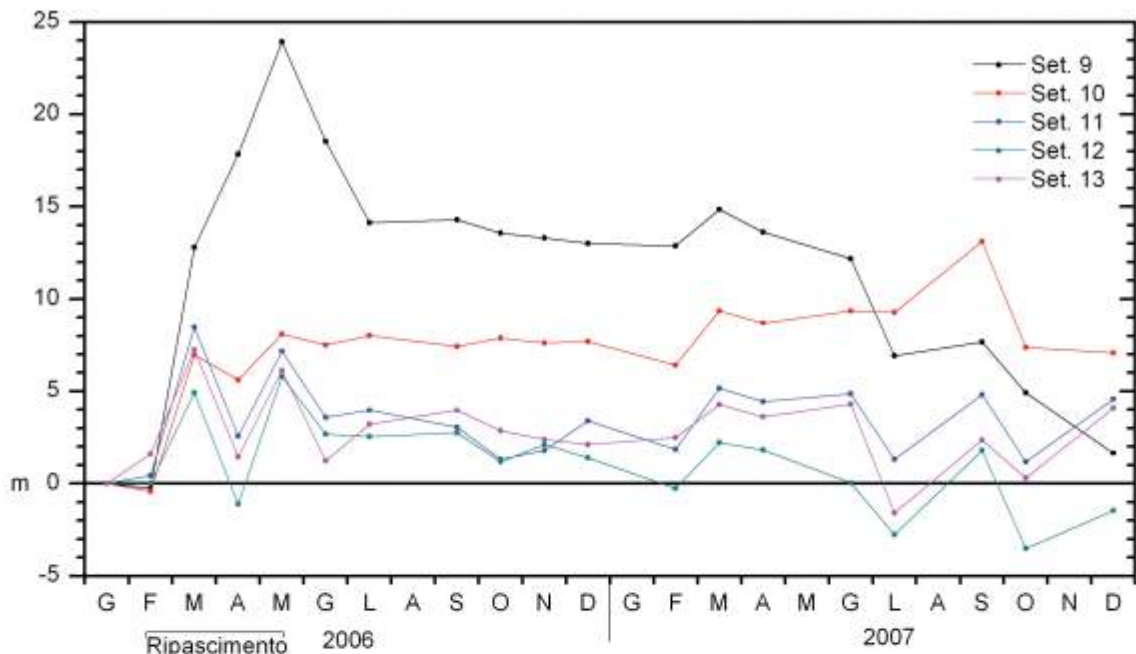


Figura 8 - Posizione media della linea di riva nei vari settori rispetto a quella del Gennaio 2006.

#### Maggio 2006 - Aprile 2007

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

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

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

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

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

#### Aprile 2007 - Dicembre 2007

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

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



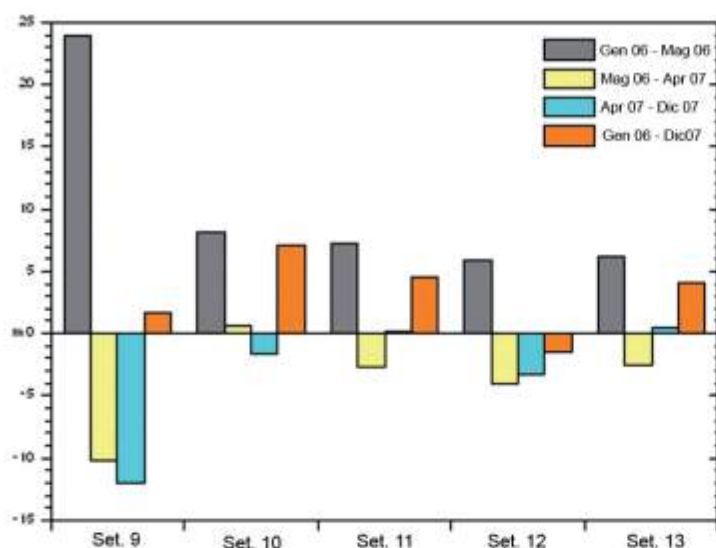


Figura 9 - Variazioni lineari da Gennaio 2006 a Dicembre 2007.

### Gennaio 2006 - Dicembre 2007

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

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

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

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

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

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

### Bilancio sedimentario

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

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

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



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

Il confronto fra il rilievo del Dicembre 2005 e quello del Dicembre 2006 indica un incremento di volume sulla spiaggia emersa di circa 57.000 m<sup>3</sup>, denunciando una perdita di circa 14.000 m<sup>3</sup> del volume versato. Una simile perdita si registra fra il Dicembre 2006 e il Novembre 2007, quando vengono a mancare circa 11.000 m<sup>3</sup> di sedimenti.

Analizzando l'evoluzione batimetrica dei fondali antistanti si ha, nel primo anno, una perdita pari a circa 142.000 m<sup>3</sup> e, nel secondo anno, un incremento di 65.000 m<sup>3</sup> di sedimenti, con un bilancio che chiude in passivo per 77.000 m<sup>3</sup>.

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

Considerando l'area del tratto di litorale interessato da queste variazioni volumetriche (824.000 m<sup>3</sup>), si ha, nel primo anno, un abbassamento medio del profilo di circa 17 cm, mentre nel secondo anno un innalzamento pari a circa 8 cm. Nei due anni di monitoraggio si è quindi misurata una variazione altimetrica media di 9 cm; si tratta, in tutti i casi, di valori inferiori ai 20 cm sopra indicati.

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

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

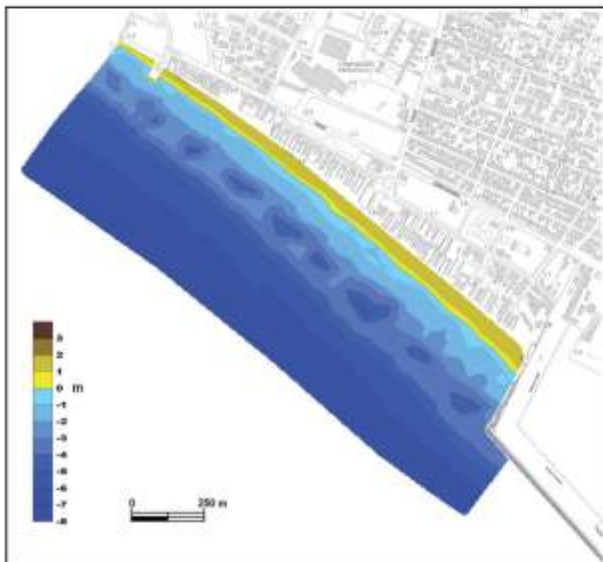


Figura 10a - Carta batimetrica del Dicembre 2006.

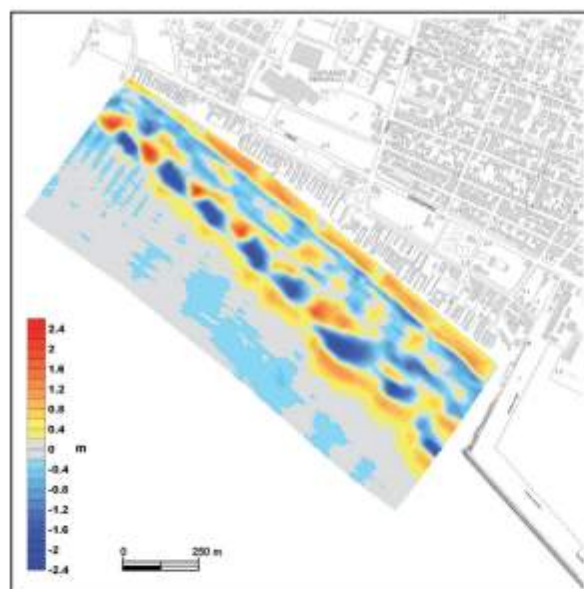


Figura 10b - Variazioni di quota fra il rilievo del Dicembre 2005 e quello del Novembre 2007.

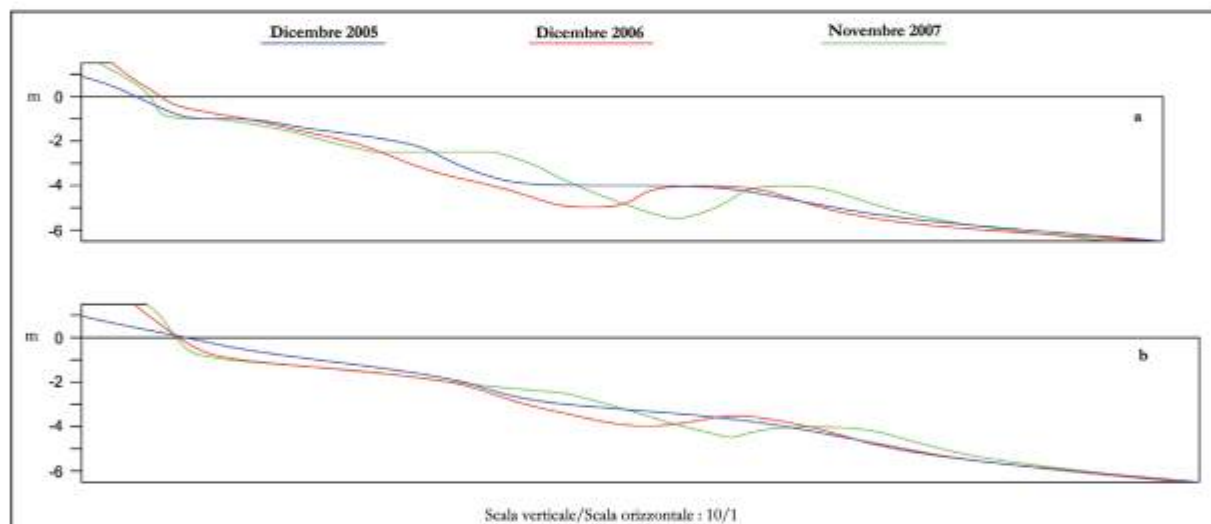


Figura 11 - Profili batimetrici lungo una sezione intersecante una depressione (a) e lungo una sezione posizionata su di un cordone perpendicolare (b).

### Evoluzione granulometrica dei sedimenti

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

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

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



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

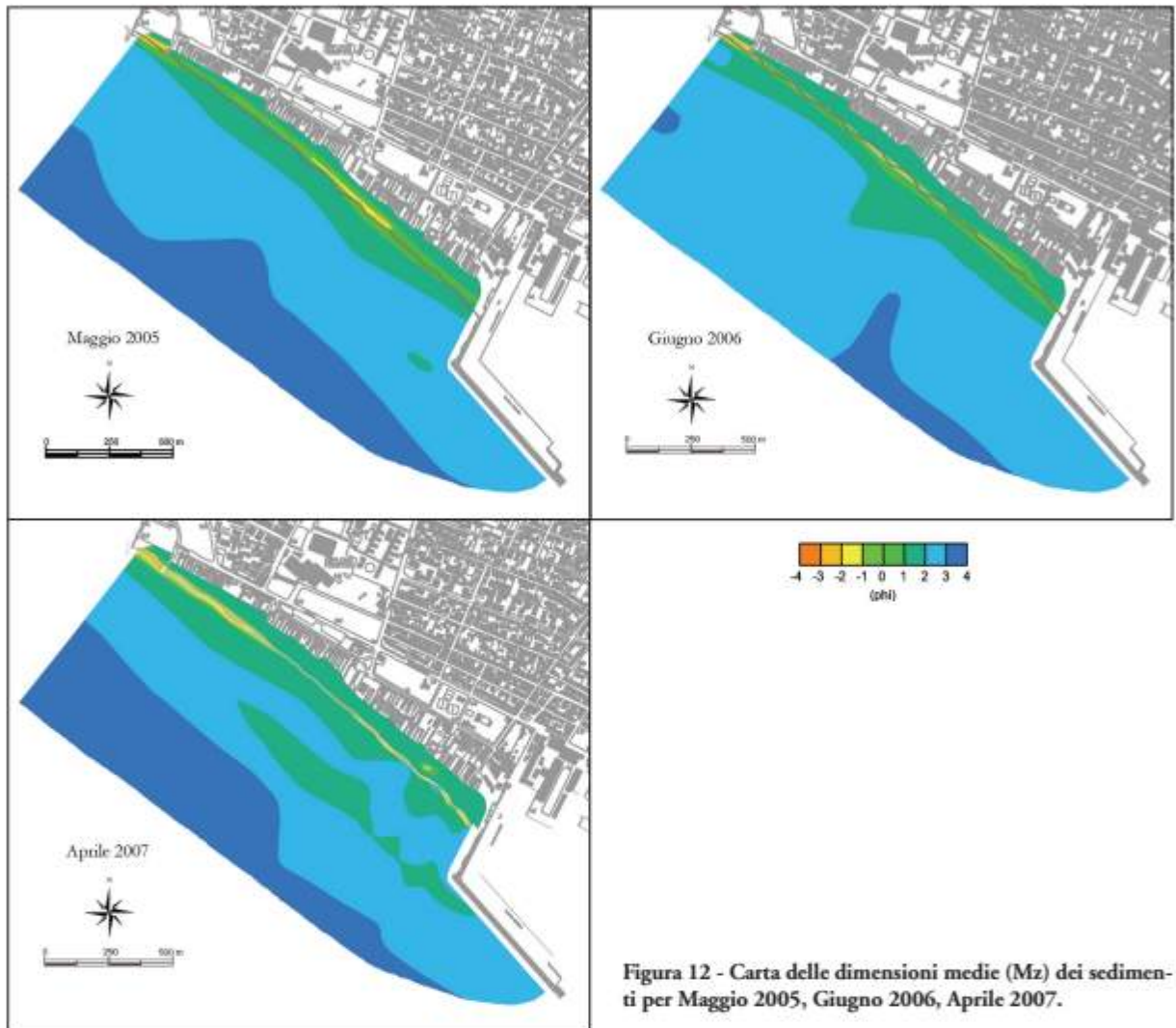


Figura 12 - Carta delle dimensioni medie (Mz) dei sedimenti per Maggio 2005, Giugno 2006, Aprile 2007.

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

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

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

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

### Conclusioni

Il ripascimento effettuato a Marina di Carrara con 71.000 m<sup>3</sup> di sabbia media ha determinato inizialmente una espansione di circa 24 m della spiaggia emersa, ma il consistente flusso sedimentario diretto verso sud, che caratterizza la zona, ha comportato una rapida redistribuzione dei sedimenti. Diciotto mesi dopo la conclusione dei lavori, il settore che più si è avvantaggiato dell'intervento non è quello sul quale il ripascimento è stato effettuato, ma quello posto immediatamente più a sud.

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

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

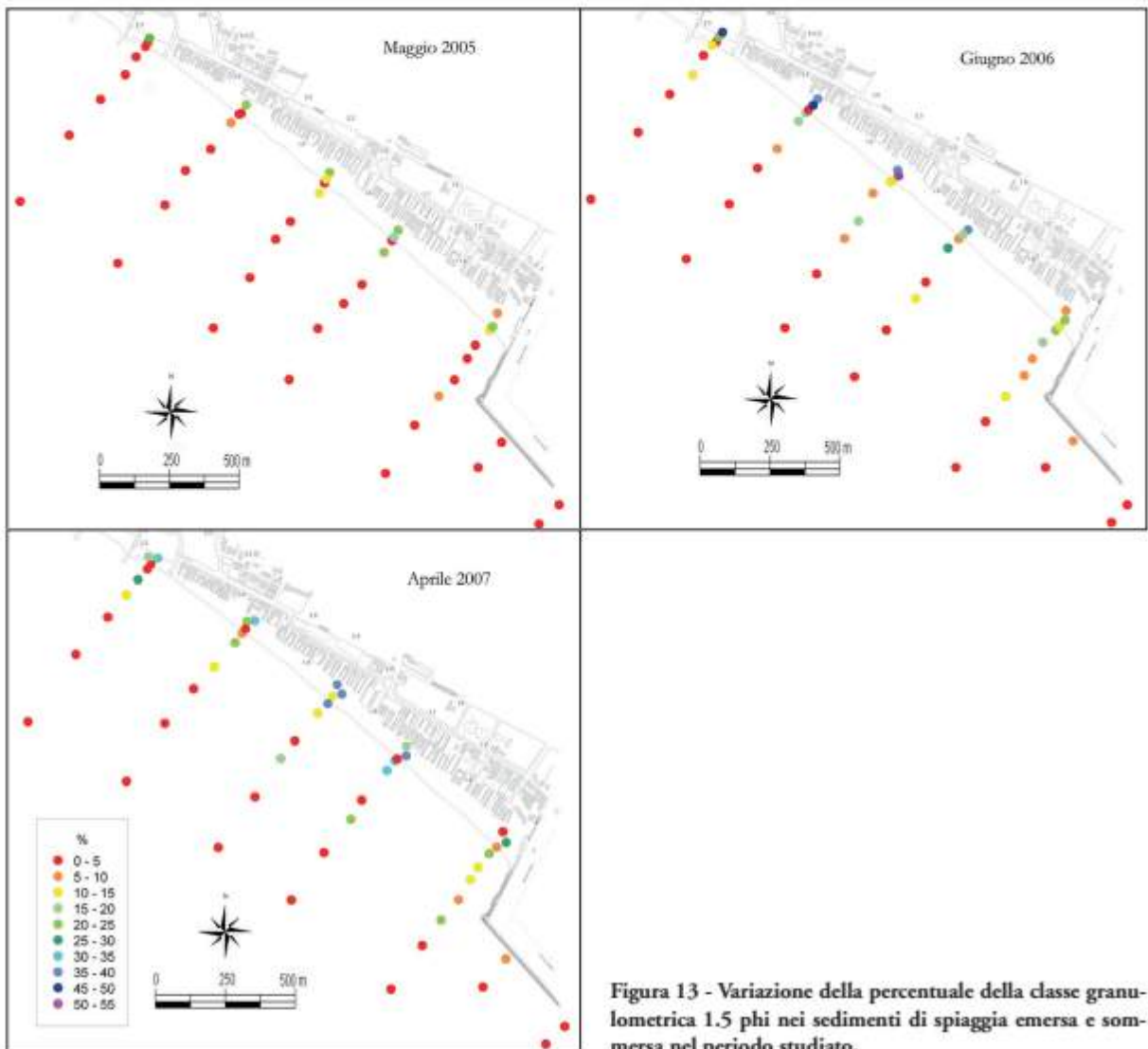


Figura 13 - Variazione della percentuale della classe granulometrica 1.5 phi nei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa nel periodo studiato.

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

### Ringraziamenti

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

### Bibliografia

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

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



## Il Catalogo delle opere di difesa costiera della Regione Campania

Diego Vicinanza<sup>1</sup>, Fiorella Galluccio<sup>2</sup>, Italo Giulivo<sup>2</sup>, Marco Tarantino<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università di Napoli  
Via Roma, 29 - 81031 Aversa, Caserta, Tel.: +39 081 5010245, Fax: +39 081 5037370,  
diego.vicinanza@unina2.it

<sup>2</sup>Regione Campania - Settore Geotecnica, Geotermia, Difesa del Suolo,  
Via De Gasperi, 28 - 80133 Napoli, Tel.: +39.081.7963196 - Fax: +39.081.7963039,  
www.difesa.suolo.regione.campania.it  
difesa.suolo@regione.campania.it

<sup>3</sup>Stagista della Regione Campania - Settore Geotecnica, Geotermia, Difesa del Suolo,  
Via De Gasperi, 28 - 80133 Napoli, Tel.: +39.081.7963196 - Fax: +39.081.7963039,  
www.difesa.suolo.regione.campania.it  
difesa.suolo@regione.campania.it

### Riassunto

Nell'ambito della mitigazione dei rischi naturali, la salvaguardia costiera costituisce uno dei principali obiettivi della programmazione della Regione Campania, come previsto dal Documento Strategico Regionale per la politica di coesione 2007-2013 (BURC n. speciale del 30 gennaio 2007).

In considerazione delle criticità dell'area costiera campana, caratterizzata da ampi tratti di spiagge in erosione, problemi di stabilità delle coste alte, problemi legati alla presenza delle opere portuali e delle opere di difesa che trasferiscono le criticità ai litorali adiacenti, si è reso necessario poter disporre di uno strumento che supportasse il processo di gestione integrata delle problematiche costiere.

Il Settore Difesa Suolo della Regione Campania si sta dotando, quindi, di un sistema informativo costiero quale strumento per la raccolta, la gestione e l'elaborazione delle conoscenze sulla costa, indispensabile per la programmazione degli interventi da realizzare per la salvaguardia costiera, per contrastare il fenomeno di erosione dei litorali, ma anche a supporto delle attività svolte dagli altri settori regionali e dagli Enti che hanno competenze in ambito costiero.

In questo contesto è stato sviluppato il Catalogo GIS delle opere di difesa delle coste della Campania basato sull'interpretazione delle ortofoto relative agli anni 2004-2005. La mappatura in ambiente GIS delle opere di difesa costiera fornisce un quadro completo ed aggiornato dello stato di protezione della costa, che permette di localizzare le opere di difesa presenti sull'intera costa campana e di conoscerne ed analizzarne contestualmente le caratteristiche.

Il Catalogo, così strutturato, ha già reso possibile effettuare alcune analisi come la valutazione dello stato di irrigidimento costiero dal 1998 al 2005 mediante il calcolo dell'Indice strutturale, cioè del rapporto tra lo sviluppo delle opere marittime e lo sviluppo della costa campana.

**Parole chiave:** Sistema Informativo della Costa (SIC), opere di difesa costiera, Indice strutturale.

## Introduzione

Molteplici sono i motivi per cui, nel corso dei secoli, gli uomini hanno scelto di insediarsi lungo la costa, ignorando più o meno consapevolmente i rischi di tale scelta. In alcuni casi l'uomo si è reso conto del rischio collegato alla instabilità del confine terra-mare ed ha saputo assecondarla mantenendo a tergo della riva una zona di rispetto. In molti altri casi questo non è avvenuto e sono evidenti i costi di queste scelte. Per quanto la ricerca abbia fatto enormi passi avanti in questo settore, restano ancora da risolvere molti dei problemi idrodinamici e morfodinamici della fascia costiera.

In Italia a tutt'oggi circa il 40% delle spiagge è in erosione così come riportato in "Lo stato dei litorali italiani", pubblicato sulla rivista Studi Costieri (GNRAC, 2006). Le cause sono comunemente da ascrivere all'azione del moto ondoso nonché al ridotto apporto di materiale solido da parte dei corsi d'acqua e alla costruzione di opere marittime.

Esistono diverse soluzioni per la difesa delle coste in erosione, sempre più spesso la tendenza dei ricercatori è quella di intervenire sull'ambiente evitando di generare grandi impatti e/o modificazioni. La scelta progettuale del tipo di difesa dipende essenzialmente dal compromesso tra una difesa di tipo strutturale, molto efficace da un punto di vista idraulico ma fortemente impattante da un punto di vista ambientale, e una di tipo morbido quale è il ripascimento artificiale.

Una corretta progettazione delle opere di difesa costiera dovrebbe prevedere i seguenti punti:

1. studio del sistema fisico in prossimità della costa e della possibile risposta della linea di riva;
2. progettazione delle opere necessarie al raggiungimento degli obiettivi prefissati con un ragionevole/basso impatto sulla costa;
3. monitoraggio delle opere e della linea di riva - risposta del sistema fisico modificato ed eventuale feedback al punto 1.

In mancanza di un idoneo monitoraggio (a tutt'oggi è quasi sempre assente) è possibile realizzare, attraverso una mappatura degli interventi di difesa che nel tempo si sono succeduti sul territorio, una valutazione della loro efficacia nella protezione della spiaggia.

Con questo obiettivo, nell'ambito del Gemellaggio AGIRE POR 2000-2006 tra il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e il Settore Difesa del Suolo della Regione Campania, è stato realizzato un catalogo delle opere di difesa costiera della Campania. Il trasferimento dei modelli procedurali nell'ambito del Gemellaggio prevedeva il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- fornire alle autorità competenti un quadro completo ed aggiornato dello stato di protezione della costa;
- capire, confrontando i rilievi relativi a periodi di tempo diversi, l'efficacia delle opere e/o i problemi che esse hanno creato;
- disporre di un livello informativo indispensabile per l'applicazione della modellistica numerica relativa alla morfodinamica costiera.

L'area di studio oggetto del lavoro comprende l'intera costa della Campania, la quale presenta un'estensione di 480 km (incluse le isole), dei quali 256 km costituiti da coste alte rocciose (materiali calcarei, terrigeni e vulcanici) e 224 km formati da coste basse (sabbiose e talvolta ciottolose). In quest'ambito circa il 40% (95 km) del litorale risulta essere in erosione (GNRAC, 2006).

La costa è quindi stata suddivisa in cinque grandi ambiti fisiografici naturali (unità fisiografiche) (Fig. 1) intesi come settori costieri svincolati da vincoli amministrativi dove i processi dinamici non sono influenzati dalle unità contigue: Golfo di Gaeta (parte campana), Golfo di Napoli, Golfo di Salerno, Costiera cilentana e Golfo di Policastro.

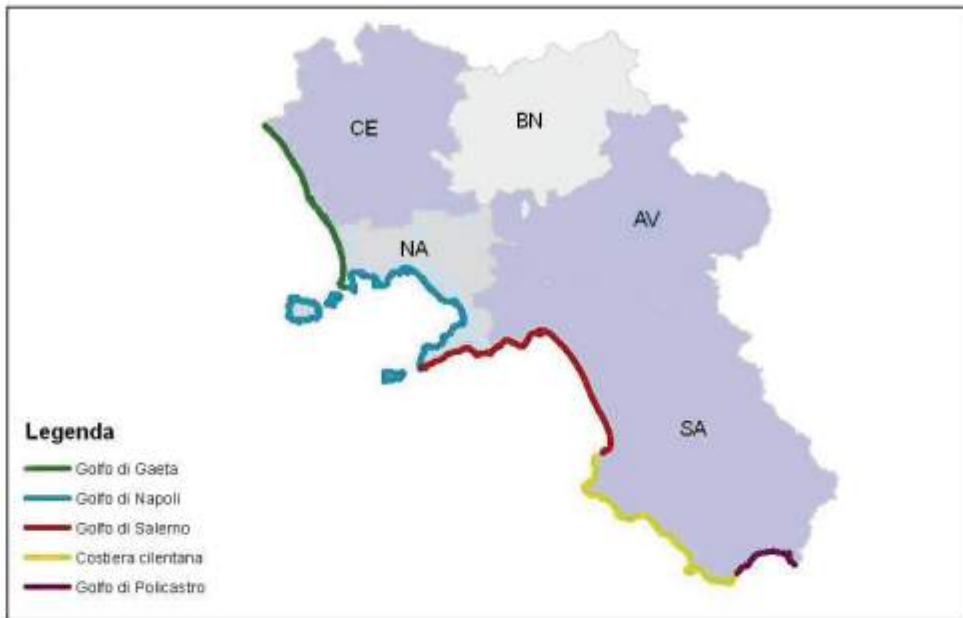


Figura 1 - Unità fisiografiche individuate lungo la costa Campana.

### Studi precedenti

In Campania gli studi in precedenza effettuati per la redazione di un catasto delle opere di difesa costiera sono molto pochi. Si può dire che ad oggi non è stato ancora pubblicato un catalogo ufficiale e le informazioni in merito si limitano ai lavori di Petrillo (2000) e Cocco (2001), che trattano rispettivamente del censimento delle opere di difesa costiera e del rischio di erosione per i litorali in Campania. Il censimento delle opere, disegnate inizialmente in ambiente CAD sulla base di foto aeree del 1994, fu poi importato in ambiente GIS ed aggiornato sulle fotografie aeree del volo 1998.

In Regione Emilia-Romagna è stato recentemente realizzato, dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS-RER), un catalogo delle opere di difesa costiera del litorale emiliano-romagnolo aggiornato dal 1943 al 2005 che viene presentato su questo numero di Studi costieri. I metodi e le procedure adottate per la realizzazione del suddetto catalogo sono stati trasferiti alla Regione Campania nell'ambito delle attività di Gemellaggio tra le due regioni. Tali metodologie sono state adottate nel seguente lavoro e verranno illustrate successivamente. Il prototipo progettuale del catalogo delle opere di difesa costiera della Regione Emilia-Romagna è stato naturalmente adattato alle esigenze della costa campana e alla tipologia di opere ivi presenti.

Altri importanti documenti di riferimento sia per la Regione Emilia-Romagna che per la Regione Campania ai fini della compilazione del catalogo sono stati: l'Atlante delle opere di sistemazione costiera (ISPRA, ex APAT, 2007), l'Atlante delle spiagge italiane (CNR-MURST, 1999) e le Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Dighe Marittime del Ministero dei Lavori Pubblici e del CNR (1995). Da questi documenti di rilevanza nazionale è stata tratta la nomenclatura utilizzata per classificare le diverse tipologie di opere di difesa costiera riportate nel seguente catalogo. L'Atlante delle spiagge italiane, attraverso la relativa cartografia, è stato un ottimo strumento di confronto per l'effettiva individuazione delle opere di difesa. Sono stati utilizzati invece gli indirizzi e i criteri per la classificazione delle opere di difesa delle coste indicati dal gruppo di lavoro del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare per descrivere le tipologie costruttive, i materiali, gli effetti idraulici e morfodinamici sulla costa delle differenti opere di difesa.

È stato anche utilizzato lo “Studio di fattibilità di un sistema regionale della portualità e degli approdi turistici e del trasporto passeggeri via mare” della Regione Campania (Assessorato ai Trasporti della Regione Campania, 2001) per la parte relativa ai dossier delle schede di rilevazione che ha permesso di estrarre informazioni sulla tipologia, la localizzazione geografica e le caratteristiche fisiche dei singoli porti.

### **Cartografia di base e tematica utilizzata**

I dati cartografici utilizzati per lo studio della costa Campana provengono dalla vasta documentazione esistente presso l'archivio del SIT per la difesa del suolo e consistono di:

#### **1. Cartografia di base**

- Ortofoto scala 1:5.000 della Regione Campania, Progetto OR.C.A. (2004-2005).
- Ortofoto 1:10.000 della Regione Campania del 1998, volo IT2000 effettuato dalla C.G.R di Parma, con risoluzione spaziale di 70 cm.
- Carta Tecnica Regionale 1:5.000 della Regione Campania (1998).
- Carta topografica programmatica 1:25.000 IGM della Regione Campania.

#### **2. Cartografia derivata**

- Linea di riva dell'anno 1998.
- Linea di riva degli anni 2004-2005.

#### **3. Caratterizzazione fisica e limiti amministrativi (Carte tematiche relative all'idrografia e ai limiti amministrativi regionali, provinciali e comunali).**

Le ortofoto aeree in scala 1:5.000 costituiscono lo strumento di base del lavoro e sono state prodotte per il progetto regionale OR.CA. Le coperture sono state realizzate tra il 2004 e il 2005 con voli aventi direzione prevalentemente est-ovest. Lungo la costa è stato necessario effettuare delle integrazioni ai voli con un minimo del 70% di copertura a terra. I fotogrammi hanno una scala media di 1:13.000 e le loro scansioni sono state effettuate con uno scanner fotogrammetrico con risoluzione di 1700 dpi (15 micron) e una dimensione a terra dei pixel di 25 cm. L'ortorettifica è stata effettuata utilizzando il DTM generato con mass points ricavati dalla CTRN (Carta Tecnica Regionale Numerica) e dalla CTPN (Carta Tecnica Provinciale Numerica), corretti nelle aree urbanizzate e lungo la fascia costiera attraverso fotointerpretazione diretta. Il taglio cartografico risultante è pari al 64° sottomultiplo dei fogli IGM 1:50.000 alla scala di 1:5000. Gli ortofotogrammi sono proiettati nel sistema di riferimento UTM-WGS84 33N ed hanno dimensioni di circa 800 MB in formato tiff e circa 150 MB in formato jpeg.

### **Strumenti e metodi**

Per la gestione e l'elaborazione dei dati è stata utilizzata una *workstation* professionale dotata della suite integrata di applicazioni GIS della ESRI ArcGIS Desktop 9.2. Le applicazioni impiegate sono state ArcMap™, ArcCatalog™ ed ArcToolbox™ che sono corredate da strumenti e comandi GIS. L'applicazione ArcMap è stata utilizzata per tutte le attività di cartografia, editing ed interrogazione dei dati. Infatti al suo interno sono state proiettate le ortofotocarte digitali 2004-2005, editate le opere di difesa costiera e ad esse associate le informazioni necessarie alla compilazione dell'archivio sulle opere stesse. L'ArcCatalog è servito per organizzare e gestire i dati, creare e amministrare il DB relativo alla feature class delle opere di difesa. Attraverso l'applicazione ArcToolbox, collezione organizzata di strumenti per il geoprocessing, sono state effettuate operazioni sui dati GIS a disposizione, quali feature class, raster e tabelle, che hanno consentito di ricavare i dati inseriti successivamente nel DB.

La metodologia adottata per la creazione del catalogo delle opere di difesa costiera è stata definita con gli esperti del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia - Romagna (SGSS-RER) e con docenti universitari esperti della realtà costiera campana. Le linee guida seguite



per un corretto approccio al lavoro di mappatura delle opere di difesa sono state discusse con il contributo del SGSS-RER e sono elencate di seguito:

- creazione di un'unica *feature class* con geometria poligonale contenente tutte le tipologie di opere di difesa costiera;
- utilizzo di una scala minima di acquisizione di 1:1000;
- associazione di una regola topologica al fine di mantenere separati i poligoni della *feature class* delle opere di difesa.

Allo strato informativo relativo alle opere di difesa costiera è stata associata una geometria di tipo poligonale che ha consentito di identificare rapidamente le strutture in fase di digitalizzazione e compilare immediatamente il DB associato.

Anche se l'alta risoluzione delle ortofoto avrebbe permesso una buona visualizzazione delle strutture di difesa, a scala di dettaglio molto elevata, si è scelto, per mantenere costante l'errore di incertezza, di tracciare le opere ad una scala media di 1:1.000.

Per quanto riguarda le regole topologiche da associare allo strato informativo, considerato che il catalogo prevede un'unica *feature class*, il solo errore che poteva comprometterne l'utilizzo era il possibile sovrapporsi dei diversi poligoni. Questo problema è stato gestito semplicemente inserendo nel DB una topologia contenente la regola *must not overlap* associata alla *feature class* delle opere di difesa.

Durante la determinazione dei principi di identificazione delle opere di difesa costiera e i criteri di classificazione, effettuati dopo una panoramica sulla tipologia e sulla distribuzione delle opere di difesa che insistono sulle unità fisiografiche della costa campana, sono stati prodotti degli schemi che illustrano i casi limite (*end members*) più frequentemente riconosciuti nello studio delle opere di difesa costiera.

Gli schemi hanno permesso di gestire le varie criticità limitando i dubbi interpretativi relativi alla classificazione di un'opera. Inoltre, sono stati determinati i parametri delle strutture di difesa da inserire nel DB.

### **Procedura**

La procedura adottata è stata mutuata, nell'ambito del Gemellaggio AGIRE POR 2000-2006, da quella sviluppata dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Il Catalogo delle opere di difesa della costa campana è stato realizzato attraverso le seguenti fasi:

1. mappatura, in ambiente GIS, delle strutture rigide riconoscibili da ortofoto relative agli anni 2004-2005;
2. classificazione delle opere mappate sulla base delle indicazioni fornite dall'Atlante delle opere di sistemazione costiera (ISPRA, ex APAT, 2007);
3. acquisizione di altre informazioni relative alle strutture di difesa (lunghezza dell'opera, distanza da riva, ampiezza varchi, ecc.);
4. preparazione e messa a punto di un database contenente informazioni di natura tecnica sulle singole opere (data di realizzazione, anno di costruzione, ecc.).

### ***Mappatura delle opere in ambiente GIS***

Attraverso la fotointerpretazione delle immagini aeree è stato possibile riconoscere la maggior parte delle difese rigide emerse e soffolte presenti lungo il litorale regionale. Per le opere emergenti, sono stati tracciati i limiti della porzione emersa delle opere pseudo-parallele o trasversali alla linea di riva, visibili al momento dello scatto della foto aerea (Fig. 2). Più in particolare è stata delineata la parte di opera al di sopra del pelo libero dell'acqua. Il limite asciutto/bagnato, spesso osservabile ed utilizzato per il tracciamento della linea di riva (Moore, 2000), è meno adatto al fine della mappatura delle opere di difesa.





Figura 2 - Opere di difesa longitudinale distaccata emersa. Litorale di Miliscola (Bacoli, Na).

Possibili errori di digitalizzazione delle opere di difesa sono da ascrivere a:

- frangenti ed increspature da moto ondoso della superficie del mare;
- riflessione della luce sulla superficie del mare (*mirror effect*).

Il metodo di mappatura che considera il limite dell'acqua è da preferirsi rispetto al limite asciutto bagnato per individuare la massima porzione emergente della struttura.

L'esempio della Figura 3 evidenzia la differenza che si avrebbe nel considerare il limite asciutto/bagnato rispetto all'effettivo pelo libero dell'acqua. Quando le condizioni meteomarine sono ottimali è possibile intravedere anche la parte sommersa dell'opera, che tuttavia si è deciso di non cartografare in quanto le condizioni possono variare su fotogrammi contigui, rendendo discontinuo questo dato.



Figura 3 - Criteri di digitalizzazione a confronto (Lungomare Via Caracciolo, Napoli).



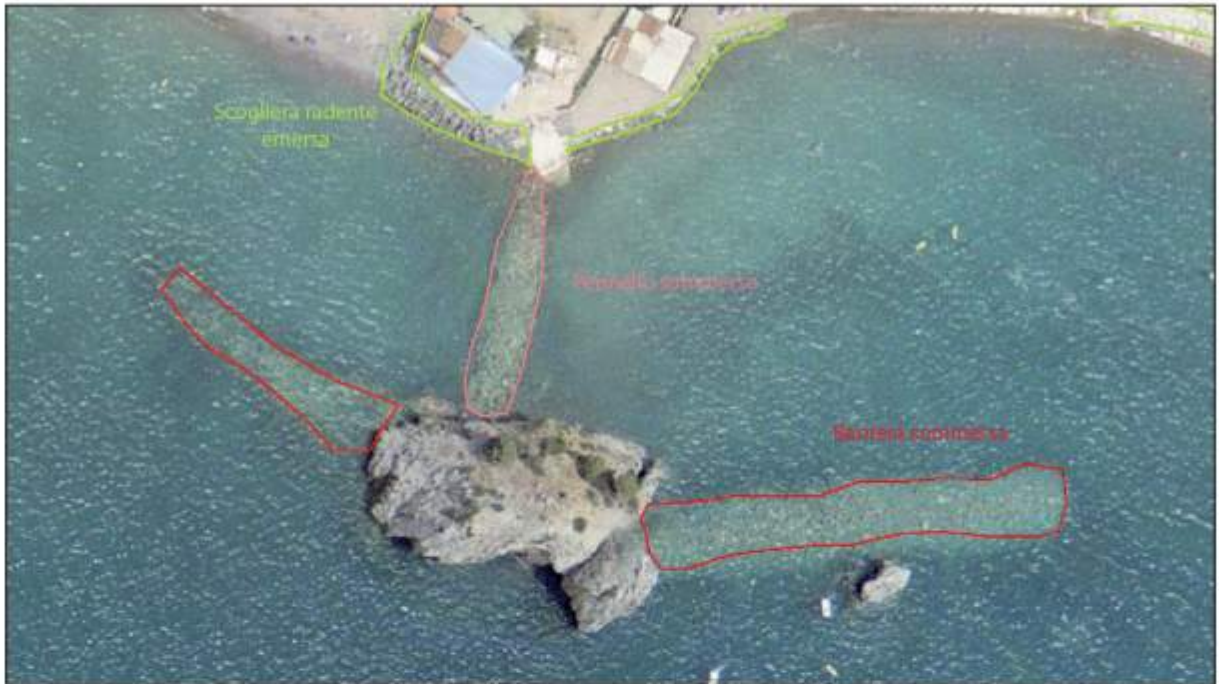


Figura 4 - Opere soffolte (Marina di Camerota, Salerno).

Nel caso delle opere soffolte, sono stati tracciati, come limiti della struttura, i margini dell'area con tonalità differente rispetto alla restante superficie del mare, osservabile sotto il livello dell'acqua al momento dello scatto della foto aerea (Fig. 4). Le opere sommerso non sono sempre perfettamente visibili dai fotogrammi, per cui sarà possibile verificare la reale configurazione progettuale dell'opera (emergente/sommerso) solo grazie alla collaborazione delle autorità locali competenti.

#### ***Classificazione delle opere di difesa costiera***

Le opere di difesa individuate lungo il litorale regionale sono state classificate seguendo per lo più le indicazioni dell'Atlante delle opere di sistemazione costiera (ISPRA, ex APAT, 2007). Fino ad ora sono state mappate esclusivamente le opere di difesa rigida, anche se è previsto che il catalogo possa essere ampliato inserendo gli interventi di difesa morbida.

Le tipologie di opere di difesa presenti sul litorale campano sono riportate in Tabella 1.

Rientrano nella classificazione anche le opere di difesa portuale, a parete verticale o a scogliera, (Fig. 5) in quanto influenzano anch'esse le dinamiche costiere. Difficoltà nell'identificazione delle opere hanno riguardato quelle strutture create dai privati a difesa dei propri stabilimenti balneari o delle proprie strutture alberghiere. In questi casi, data la natura composta delle strutture, si è deciso di classificare le opere come difese miste.

La tabella seguente riporta sinteticamente la classificazione ISPRA (ex APAT) e le definizioni alternative utilizzate per esempio negli indirizzi e i criteri per la difesa delle coste indicati dal gruppo di lavoro del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Si è ritenuto opportuno aggiungere la voce Difesa portuale, contrassegnata con (\*), per completezza nella compilazione del Catalogo.



Figura 5 - Opere di difesa portuale a scogliera (Porto di Agropoli, Salerno).

Tabella 1 - Le tipologie di opere presenti sul litorale campano.

Classificazione Generale	Descrizione	Posizione rispetto a L.m.m.	Definizioni alternative	Tipologia costruttiva
Difesa longitudinale aderente	Struttura posta a ridosso della riva	emergente	Rivestimento	Rivestimento in massi naturali o artificiali
			Muro di sponda	Struttura in cls
			Scogliera radente	Scogliera in massi naturali o artificiali
Difesa longitudinale distaccata	Struttura posta distanziata dalla riva e ad essa parallela	emergente	Barriera frangiflutti emergente	Scogliera in massi naturali o artificiali
		soffolta	Barriera frangiflutti sommersa	
Difesa trasversale (Pennello)	Struttura posta ortogonalmente e/o obliquamente rispetto alla linea di riva	emergente	Pennello	Scogliera in massi naturali o artificiali
		soffolta	Pennello sommerso Pennello semi-sommerso	
Difesa mista	Pennelli con segmenti paralleli alla spiaggia aggiunti alla sezione principale trasversale (forma risultante composta a T o ad L)	emergente	Pennello a T o L emergente	Scogliera in massi naturali o artificiali
		soffolta	Pennello a T o L sommerso	
			Pennello a T o L semi-sommerso	
Difesa portuale [*]	Strutture posizionate parallelamente e/o ortogonalmente alla linea di riva	emergente	Diga a scogliera	Scogliera in massi naturali o artificiali
			Diga a parete verticale	Struttura in cls

### **Parametri determinati per le strutture di difesa**

Il catalogo consente di calcolare in automatico i fondamentali parametri geometrici quali le dimensioni delle opere, e di ricavare quelli strutturali mediante analisi come la distanza dalla linea di riva o l'ampiezza dei varchi fra opere contigue. Ad esempio, ad ogni scogliera longitudinale emersa sono stati associati i seguenti attributi:

- ampiezza dell'opera: AMP\_BASE (metri);
- lunghezza longitudinale dell'opera: L\_OPERA\_M (metri);
- orientamento dell'opera rispetto al nord: AZIMUT (gradi).

Questi tre attributi sono stati calcolati attraverso uno *script* associato alla *toolbox Bounding Containers*. Lo *script* crea intorno ad ogni singolo poligono della *feature class* relativa alle opere di difesa costiera un contorno rettangolare minimo e di questo calcola in automatico la lunghezza dell'asse minore, dell'asse maggiore e l'orientazione rispetto al nord. Per i poligoni più irregolari, cioè quelli tracciati per definire le opere di difesa aderenti, che seguono le sinuosità del litorale, le lunghezze sono state calcolate con la funzione manuale del *measurement tool* in quanto l'errore rispetto alla grandezza reale dell'opera non poteva essere considerato accettabile.

- misura della distanza tra una struttura e la successiva. Per una omogeneità dei dati, ad ogni struttura è stata associata l'ampiezza del varco più a nord della stessa: AMP\_VARCO\_N (metri).
- distanza di ogni struttura longitudinale emersa dalla linea di riva digitalizzata sulle immagini O.R.CA. 2004-2005. Quando la struttura è posizionata obliquamente alla linea di riva, si è scelto di calcolare la distanza da una posizione intermedia lungo la direzione longitudinale della struttura: D\_RIVA (metri). Il parametro è stato calcolato per il momento solo per effettuare delle stime generali sulle variazioni della linea di riva in quanto l'accuratezza del dato da cui deriva presenta un errore di incertezza di circa 10 m. Il campo verrà aggiornato non appena sarà digitalizzata la nuova e più accurata linea di riva 2004-2005.

Questi sono i principali parametri strutturali relativi alle singole opere. L'importanza di conoscere la lunghezza e la larghezza alla base di ogni opera è relativa al calcolo dell'indice strutturale e alla gestione della manutenzione delle costruzioni di difesa. La distanza dalla riva invece è un parametro importante per la valutazione degli effetti negativi o positivi che una singola opera può apportare alla costa. L'ampiezza dei varchi e l'orientazione sono fondamentali per l'applicazione della modellistica numerica relativa alla propagazione delle onde nelle aree costiere.

Inoltre, le informazioni relative ad ogni opera sono state completate con:

- anno della linea di riva rispetto a cui è stata calcolata la distanza della struttura. La linea di riva presa come base di riferimento è quella digitalizzata sul volo O.R.CA. 2004-2005: ANNO\_DIST
- linea di riva a cui si fa riferimento: FONTE\_

### **Indici strutturali della costa campana**

Il censimento effettuato ha permesso di indentificare tutte le opere di difesa costiera e portuali presenti lungo la costa campana. Per ogni unità fisiografica (Fig. 1) sono stati calcolati gli indici strutturali (I) che si ottengono dal rapporto tra lo sviluppo delle opere costiere (D) e lo sviluppo di costa (N).

#### **Golfo di Gaeta**

Sono state individuate 52 opere di difesa costiera e 2 porti turistici (4 opere di difesa portuale) che insistono su un tratto di costa di circa 12 km (D). La tipologia delle opere di difesa è costituita da 19 difese aderenti, 6 difese distaccate, 19 difese trasversali, 8 difese miste (Tab. 2). La maggior parte delle strutture protegge le aree in destra e sinistra Foce Volturno. In questa zona le opere sono in cattivo stato, infatti i 14 pennelli posti lungo il litorale di Pineta Mare risultano essere fortemente ridotti in lunghezza, nell'ordine dei 100 metri, rispetto ai dati di Cocco (2001), e le testate dei pennelli a T sono quasi sempre completamente sommerse. Lo sviluppo naturale della costa (N) è di circa 58 km e l'indice strutturale (I) è pari a 0,21.



Tabella 2 - Tabella riassuntiva delle strutture presenti nell'unità fisiografica del Golfo di Gaeta.

TIPO OPERA	BARRIERA EMERGENTE	BARRIERA SOMMERSA	INVESTIMENTO	MURO DI SFONDA	SCOGGERA RADENTE	PENNELLO EMERGENTE	PENNELLO a L	PENNELLO a T	PENNELLO SEM-SOMMERSO	DIGA A PARETE VERTICALE	DIGA A SCOGGERA	Totale
DIFESA LONGITUDINALE ADERENTE			17	0	2							19
DIFESA LONGITUDINALE DISTACCATA	2	4										6
DIFESA MISTA							2	6				8
DIFESA PORTUALE										4	0	4
DIFESA TRASVERSALE						19			0			19
<b>Totale</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>17</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>19</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>56</b>

### Golfo di Napoli

Sono state catalogate 498 opere di difesa e 29 porti tra commerciali e turistici (6 lungo il litorale flegreo, 4 lungo quello napoletano, 5 lungo il litorale vesuviano, 4 lungo la costiera sorrentina, 6 nell'Isola d'Ischia, 3 nell'Isola di Procida, 1 a Capri) con le relative opere di difesa portuale (46). Le difese rilevate sono state così suddivise: 178 opere di difesa aderente con lunghezza variabile tra 20 e 750 m; 202 opere di difesa distaccate dalla riva con lunghezza variabile da poche decine ad oltre 600 m; 62 opere di difesa trasversale con lunghezza variabile tra 35 e 230 m; 10 opere di difesa mista di cui 6 pennelli a T (Tab. 3). L'unità fisiografica del Golfo di Napoli, isole comprese, ha  $N = 305$  km con  $D = 93,5$  km. La macro unità fisiografica napoletana è stata suddivisa in sub-unità più piccole per il calcolo dell'indice strutturale (Fig. 6).

Tabella 3 - Tabella riassuntiva delle strutture presenti nell'unità fisiografica del Golfo di Napoli.

TIPO OPERA	BARRIERA EMERGENTE	BARRIERA SOMMERSA	INVESTIMENTO	MURO DI SFONDA	SCOGGERA RADENTE	PENNELLO EMERGENTE	PENNELLO a L	PENNELLO a T	PENNELLO SEM-SOMMERSO	DIGA A PARETE VERTICALE	DIGA A SCOGGERA	Totale
DIFESA LONGITUDINALE ADERENTE			145	9	24							178
DIFESA LONGITUDINALE DISTACCATA	193	9										202
DIFESA MISTA							2	8				10
DIFESA PORTUALE										2	48	50
DIFESA TRASVERSALE						61			1			62
<b>Totale</b>	<b>193</b>	<b>9</b>	<b>145</b>	<b>9</b>	<b>24</b>	<b>61</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>48</b>	<b>502</b>



Figura 6 - Suddivisione della macro unità fisiografica napoletana in sub-unità più piccole per il calcolo dell'Indice strutturale.

### Golfo di Pozzuoli:

$N = 21$  km;  $D = 17$  km;  $I = 0,81$ .

È il più alto della costa campana e crescerà ancora in quanto attualmente sono in corso i lavori per l'ampliamento del porto di Pozzuoli.

### Litorale napoletano e vesuviano:

$N = 79$  km;  $D = 60$  km;  $I = 0,76$ .

### Isole:

- Ischia:  $N = 57,7$  km;  $D = 12,2$  km;  $I = 0,21$

- Capri:  $N = 27,7$  km;  $D = 1$  km;  $I = 0,03$

- Procida:  $N = 24,7$  km;  $D = 2,8$  km;  $I = 0,11$



### Golfo di Salerno

Le opere individuate sono 98 così suddivise: 50 difese aderenti di lunghezza variabile tra 13 e 495 m, 25 difese distaccate di lunghezza variabile tra 25 e 400 m, 7 difese trasversali di lunghezza variabile tra 17 e 173 m e una difesa mista. Sono state censite 15 dighe a scogliera a protezione dei moli di 6 porti (3 lungo la costiera amalfitana, 2 lungo il litorale di Salerno, 1 ad Agropoli) (Tab. 4).

$N = 84,5$  km;  $D = 13,5$  km;  $I = 0,16$ .

**Tabella 4 - Tabella riassuntiva delle strutture presenti nell'unità fisiografica del Golfo di Salerno.**

TIPO OPERA	BARRIERA EMERGENTE	BARRIERA SOMMERSA	RIVESTIMENTO	MURO DI SPONDA	SCOGLIERA RADENTE	PENNELLO EMERGENTE	PENNELLO +L	PENNELLO +T	PENNELLO SEMI-SOMMERSO	DIGA A PARETE VERTICALE	DIGA A SCOGLIERA	Totale
DIFESA LONGITUDINALE ADERENTE			42	6	3							51
DIFESA LONGITUDINALE DISTACCATA	24	1										25
DIFESA MISTA							1	0				1
DIFESA PORTUALE										0	14	14
DIFESA TRASVERSALE						7			0			7
<b>Totale</b>	<b>24</b>	<b>1</b>	<b>42</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>14</b>	<b>98</b>

### Costiera cilentana

Lungo la costiera cilentana sono state rilevate 137 opere di difesa così di seguito riportate: 44 difese aderenti con lunghezza compresa tra 15 e 445 m, 37 difese distaccate con lunghezza compresa tra 20 e 160 m e 41 difese trasversali con lunghezza compresa tra 3 e 80 m. Le difese portuali di S. Marco di Castellabate, Montecorice, Acciaroli, Pollica, Casalvelino, Pisciotta, Palinuro e Marina di Camerota sono composte da 15 dighe a scogliera di lunghezza variabile dai 75 ai 535 m (Tab. VII).  $N = 112$  km;  $D = 15$  km;  $I = 0,13$  (Tab. 5).

**Tabella 5 - Tabella riassuntiva delle strutture presenti nell'unità fisiografica della Costiera Cilentana.**

TIPO OPERA	BARRIERA EMERGENTE	BARRIERA SOMMERSA	RIVESTIMENTO	MURO DI SPONDA	SCOGLIERA RADENTE	PENNELLO EMERGENTE	PENNELLO +L	PENNELLO +T	PENNELLO SEMI-SOMMERSO	DIGA A PARETE VERTICALE	DIGA A SCOGLIERA	Totale
DIFESA LONGITUDINALE ADERENTE			23	1	19							43
DIFESA LONGITUDINALE DISTACCATA	33	4										37
DIFESA PORTUALE							0	0			15	15
DIFESA TRASVERSALE						35			5	0		41
<b>Totale</b>	<b>33</b>	<b>4</b>	<b>23</b>	<b>1</b>	<b>19</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>136</b>

### Golfo di Policastro

Le opere di difesa individuate sono 43 di cui 16 difese aderenti di lunghezza compresa tra 11 e 240 m, 8 difese distaccate tra 22 e i 92 m, 11 difese trasversali tra 13 e i 56 m. I porti di Scario, Marina di Policastro e Sapri sono protetti da 8 opere di difesa portuale di lunghezza che varia tra 70 e 360 m (Tab. 6).  $N = 34,5$  km;  $D = 3,7$  km;  $I = 0,11$ .

**Tabella 6 - Tabella riassuntiva delle strutture presenti nell'unità fisiografica del Golfo di Policastro.**

TIPO OPERA	BARRIERA EMERGENTE	BARRIERA SOMMERSA	RIVESTIMENTO	SCOGLIERA RADENTE	MURO DI SPONDA	PENNELLO EMERGENTE	PENNELLO +L	PENNELLO +T	PENNELLO SEMI-SOMMERSO	DIGA A PARETE VERTICALE	DIGA A SCOGLIERA	Totale
DIFESA LONGITUDINALE ADERENTE			7	9	0							16
DIFESA LONGITUDINALE DISTACCATA	5	0										5
DIFESA PORTUALE							0	0			8	8
DIFESA TRASVERSALE						11			0	0		11
<b>Totale</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>43</b>

Si riporta nel seguito il confronto tra gli indici strutturali del 1998 e del 2005 (Figg. 7, 8 e 9, Tabb. 7 e 8). Il Golfo di Napoli risulta essere il tratto di costa più irrigidito, mentre la costiera cilentana e il Golfo di Policastro restano sostanzialmente invariati in quanto le due unità fisiografiche sono costituite per la metà da costa alta. Un esempio del forte impatto delle opere di difesa costiera è riportato in Figura 10 per un tratto di costa vesuviana. Nella figura è evidente come le opere si susseguano senza soluzione di continuità. In Figura 11 è stato poi riportato un esempio dettagliato delle opere di difesa presenti in Via Caracciolo, Napoli.

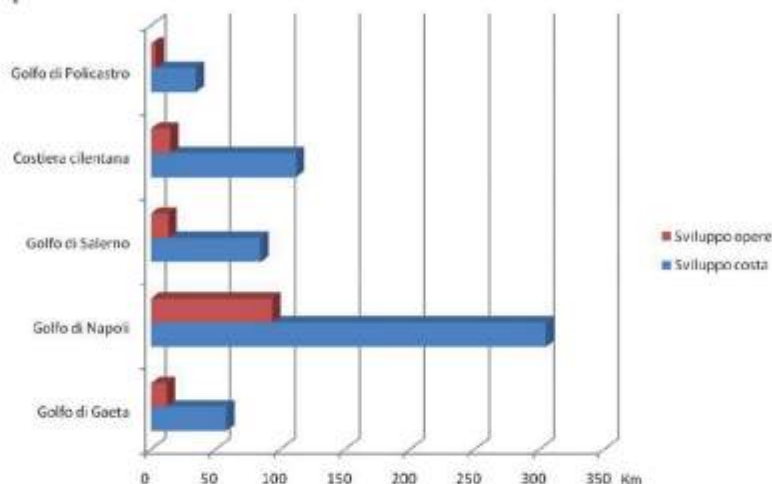


Figura 7 - Confronto tra lo sviluppo delle opere costiere e lo sviluppo della costa per ogni unità fisiografica.

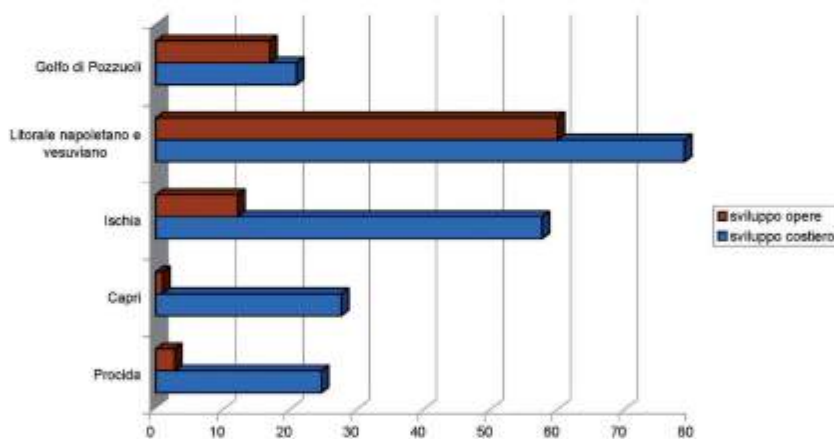


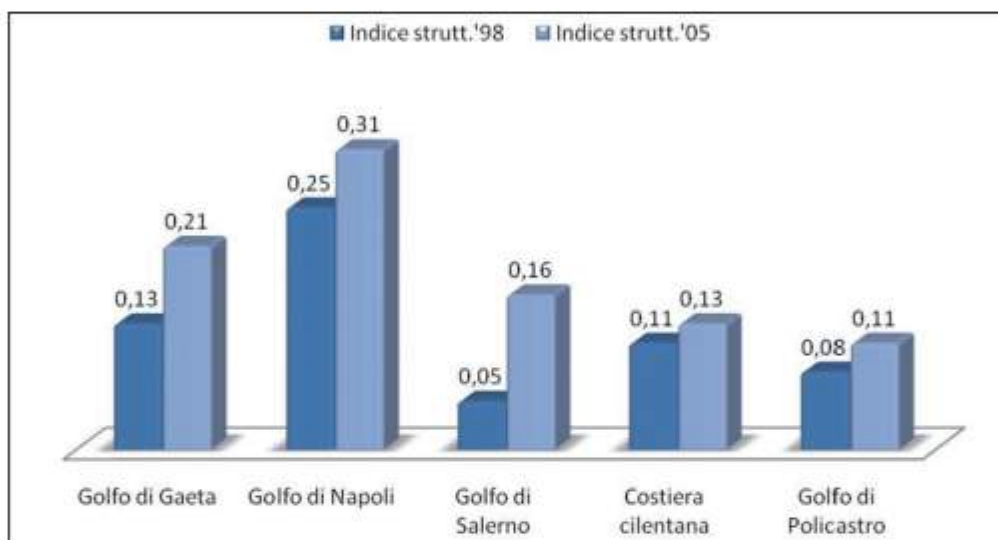
Figura 8 - Confronto tra lo sviluppo delle opere costiere e lo sviluppo della costa per le sub-unità fisiografiche del Golfo di Napoli.

Tabella 7 - Tabella riassuntiva dello sviluppo di costa, costa protetta e relativi indici strutturali per ogni unità fisiografica della costa campana.

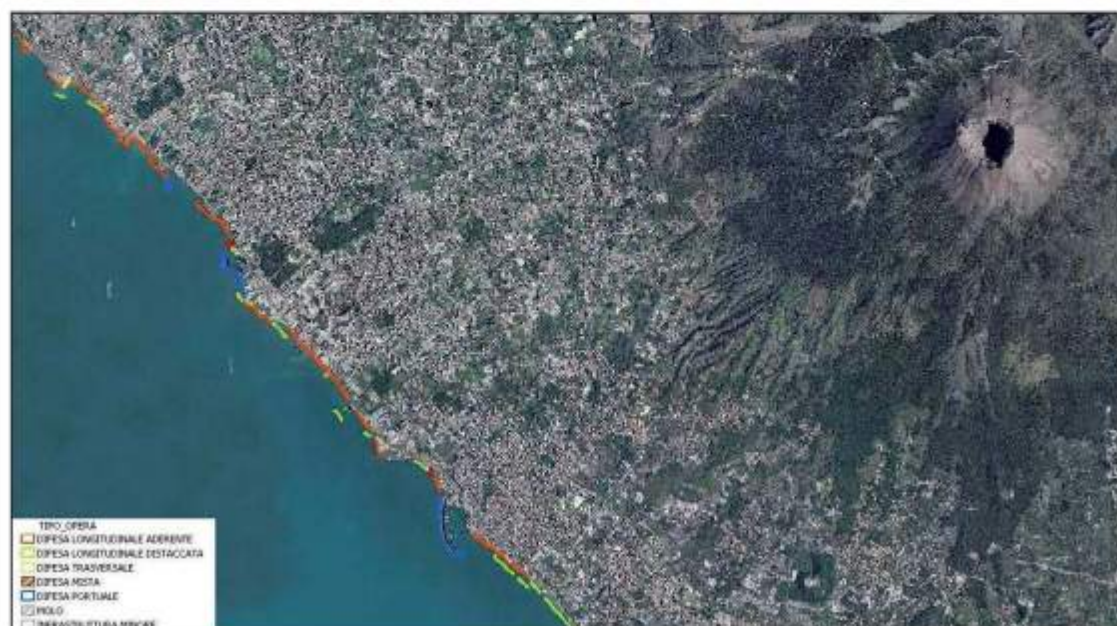
UNITA' FISIOGRAFICHE COSTA CAMPANA	COSTA		COSTA PROTETTA		INDICE STRUTTURALE
	km	%	km	%	
Golfo di Gaeta	58 km	10 %	12 km	9 %	0,21
Golfo di Napoli	305 km	51 %	93,5 km	68 %	0,31
Golfo di Salerno	84,5 km	14 %	13,5 km	10 %	0,16
Costiera cilentana	112 km	19 %	15 km	11 %	0,13
Golfo di Policastro	34,5 km	6 %	3,7 km	3 %	0,11

**Tabella 8 - Tabella riassuntiva dello sviluppo di costa, costa protetta ed i relativi indici strutturali delle sub-unità fisiografiche del Golfo di Napoli.**

SUB-UNITÀ FISIOGRAFICHE GOLFO DI NAPOLI	COSTA		COSTA PROTETTA		INDICE STRUTTURALE
	km	%	km	%	
Golfo di Pozzuoli	21 km	10%	17 km	18%	0,81
Litorale napoletano/vesuviano	79 km	38%	60 km	65%	0,75
Ischia	57,7 km	27%	12,2 km	13%	0,21
Capri	27,7 km	13%	1 km	1%	0,03
Procida	24,7 km	12%	2,8 km	3%	0,11



**Figura 9 - Confronto tra gli Indici strutturali del 1998 e del 2005.**



**Figura 10 - Opere di difesa costiera per un tratto di costa vesuviana.**



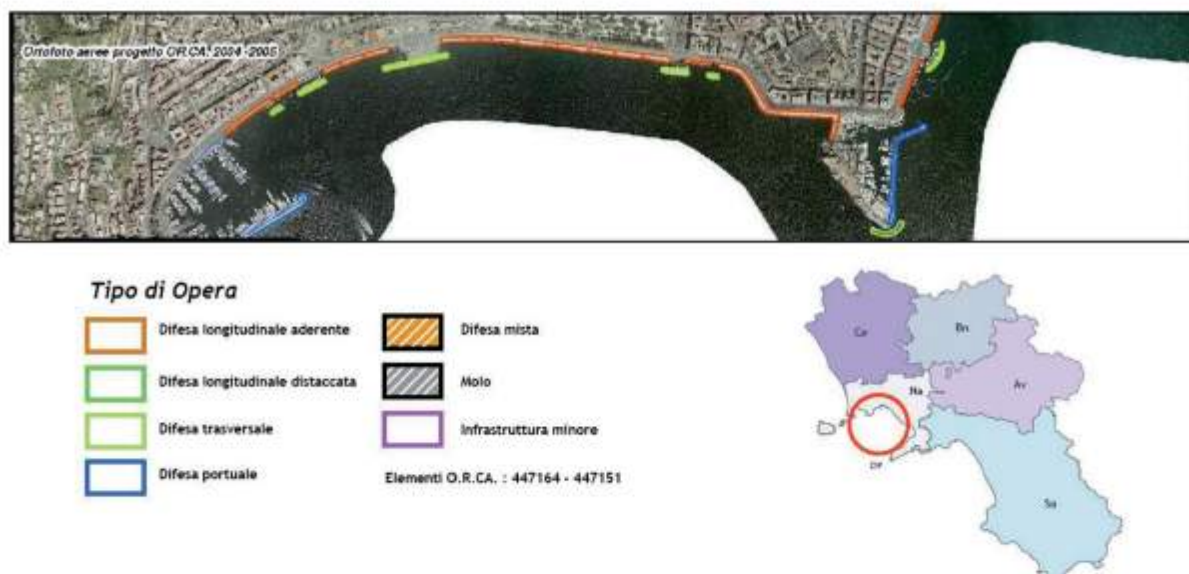


Figura 11 - Opere di difesa presenti in via Caracciolo (Napoli).

## Conclusioni

Il lavoro presentato in questa pubblicazione è il primo Catalogo ufficiale delle opere di difesa della costa campana. Basato sulla interpretazione di ortofoto in scala 1:5.000 relative agli anni 2004-2005, il Catalogo contiene dati geografici e alfanumerici sulle caratteristiche strutturali e costruttive delle opere di difesa costiera rilevate. I dati raccolti costituiscono un tematismo del Sistema Informativo Territoriale per la Gestione integrata delle problematiche costiere della Campania, che è in via di costituzione presso il Settore Difesa del Suolo della Regione Campania a seguito delle attività del Progetto di Gemellaggio AGIRE POR con la Regione Emilia-Romagna.

Il Catalogo delle opere di difesa della costa campana fornisce all'utente - cittadino, professionista o Ente competente - un quadro completo ed aggiornato dello stato di protezione della costa. Il confronto tra i rilievi relativi a periodi di tempo diversi consente la verifica dell'efficacia delle opere costiere e/o dei problemi che esse hanno creato, e quindi la programmazione degli interventi, siano essi di manutenzione di opere già esistenti o di realizzazione di nuove opere.

Il lavoro ha già consentito di aggiornare al 2005 i dati dell'indice strutturale di ogni singola unità fisiografica della costa campana. In particolare confrontando i risultati ottenuti con i dati riportati in "Lo stato dei litorali italiani" (GNRAC, 2006), relativi alla regione Campania ed aggiornati al 1998, è stato possibile effettuare stime relative alla variazione dello stato di irrigidimento della costa.

Il Catalogo fornisce inoltre il livello informativo di base indispensabile per l'applicazione della modellistica numerica relativa alla morfodinamica costiera.

La disponibilità di strati informativi relativi a periodi antecedenti al 1998 consentirà una lettura più completa e significativa dell'evoluzione costiera. Le attività proseguiranno con l'utilizzo delle foto aeree relative agli anni 1943, 1954 e 1994, al momento in fase di georeferenziazione e ortorettifica, per procedere alla mappatura delle opere di difesa costiera storiche e delle relative linee di riva, così da completare la parte storica del Catalogo.

Il Catalogo è consultabile tramite WebGis dal sito del Settore Difesa del Suolo nell'Area Tematica: Difesa delle Coste all'indirizzo <http://www.difesa.suolo.regione.campania.it>

Il Catalogo delle opere di difesa della costa campana costituisce, in conclusione, il primo tassello per una gestione integrata delle problematiche costiere e lo strumento GIS utilizzato offre il supporto tecnico più efficace per la gestione, elaborazione ed interpretazione dei dati.

## Ringraziamenti

Il Catalogo delle opere di difesa costiera della Campania è stato realizzato dal Settore Difesa del Suolo della Regione Campania nell'ambito del Gemellaggio AGIRE POR 2000-2006 con il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, per lo sviluppo di un sistema informativo per la gestione della costa.

Si ringrazia il Gruppo SIT, del Settore Difesa del Suolo.

Gli Autori ringraziano tutti i partecipanti al Gemellaggio ed in particolare il Dott. Raffaele Pignone e la Dott.ssa Luisa Perini della Regione Emilia-Romagna.

## Bibliografia

- Assessorato ai Trasporti della Regione Campania (2001) - *Studio di fattibilità di un sistema regionale della portualità e degli approdi turistici e del trasporto passeggeri via mare della Regione Campania*. Rapporto inedito.
- Berger A.R. e Jans W.J. (1996) - *Geoindicators: Assessing rapid environmental changes in earth systems*. Rotterdam, A.A. Balkema. 466 p.
- Boak E.H. e Turner I.L. (2005) - *Shoreline definition and detection: a review*. *Journal of Coastal Research*, 21: 688-703.
- Calabrese L. e Lorito S. (2007) - *La mappatura della linea di riva attraverso la fotointerpretazione – appunti*. Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Regione Emilia-Romagna. Report Interno.
- Catalogo delle opere di difesa della costa emilianoromagnola*: [http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/costa/progetti/04\\_catalogo\\_opere\\_difesa\\_costa.htm](http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/costa/progetti/04_catalogo_opere_difesa_costa.htm).
- CNR – MURST (1999) - *Atlante delle Spiagge Italiane*. S.El.Ca., Firenze, 108 tavole.
- Cocco E., De Magistris M.A., Bentivoglio C., Iacono Y. e Serpico M. (1993) - *Processi erosivi, opere di difesa e riequilibrio dei litorali in Campania*. In “La difesa dei litorali in Italia” a cura di Aminti P. e Pranzini E., Edizioni delle Autonomie, 34: pp. 175-194.
- Cocco E., De Magistris M.A., Iuliano S., Mangioli A., Pugliese Caratelli E. e Spulsi G. (2001) - *Assesment of erosion and wave risk over coastal areas*. *Coastal Engineering V* (C.A. Trebbia Ed.), Southampton, Boston, WIT Press, pp. 277-287.
- Cocco E. (2001) - *Il rischio per erosione dei litorali*. In “L’ambiente geologico in Campania” a cura di A. Vallario, CUEN, Napoli, pp. 369- 382.
- Cortemiglia G.C. (1991) - *Fruizione dei litorali e pianificazione costiera*. In “Politica globale” a cura di Carlo Boggio, Edizioni Marietti, Genova, pp. 97-103.
- European Commission (2007) - *Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE)*. Official Journal of the European Union, L. 108, v. 50.
- GNRAC (2006) - *Lo stato dei litorali italiani*. A cura del Gruppo Nazionale per la Ricerca sull’Ambiente Costiero. Studi Costieri, 10: 3-174.
- ISPRA (ex APAT) (2007) - *Atlante delle opere di sistemazione costiera - Manuali e Linee guida*, 44/2007, Roma.
- Kraus N.C. e Rosati J.T. (1997) - *Interpretation of shoreline position data for coastal engineering analysis*. CETN-II-39, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Li R., Di K. e Ma. R. (2001) - *A comparative study of shoreline Mapping techniques*. The 4th International Symposium on Computer mapping and GIS for Coastal Zones Management, Halifax, Nova Scotia, Canada, June 18-20, 2001.
- Lorito S. e Calabrese L. (2007) - *Tipi di Linea di Costa*. Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Regione Emilia-Romagna. Report Interno.
- Ministero dei Lavori Pubblici - CNR (1996) - *Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Dighe Marittime*. Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, pubbl.1450, Roma



- Moore L. (2000) - *Shoreline mapping techniques*. Journal of Coastal Research 16: 111-124.
- Perini L., Lorito S., Luciani P. e Gardelli M. (2006) - *Il Catalogo delle opere di difesa della costa e delle opere marittime della Regione Emilia Romagna*. Regione Emilia-Romagna. Report Interno.
- Perini L., Calabrese L., Cibin U., Lorito S. e Luciani P. (2007) - *Il Sistema Informativo della Costa e i prodotti cartografici di supporto agli studi e alle strategie di difesa*. In "Ambiente e Territorio" n. 127. Terzo Forum Nazionale. Pianificazione e tutela del territorio costiero. Questioni, metodi, esperienze a confronto. A cura di Erminio Ferrucci, pp. 71-88.
- Petrillo S. (2000) - *Assetto costiero campano: censimento opere di difesa ed analisi critica delle variazioni indotte sull'evoluzione di alcuni tratti litoranei*. Tesi di laurea Università di Napoli Federico II.

**Contributo tecnico ricevuto il 3/7/2008.**

## Il colore della sabbia: percezione, caratterizzazione e compatibilità nel ripascimento artificiale delle spiagge

Enzo Pranzini

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

### Riassunto

Il ripascimento artificiale, sempre più frequentemente utilizzato per la difesa dei litorali, può determinare modificazioni del colore delle spiagge con una sostanziale variazione di una delle principali caratteristiche del paesaggio costiero. Anche se in alcuni casi le trasformazioni sono state valutate positivamente dagli utilizzatori, molto spesso l'immissione di sedimenti di colore diverso ha innescato polemiche approdate alle aule giudiziarie.

La caratterizzazione cromatica delle sabbie e delle ghiaie non è semplice a causa della loro disomogeneità. In questo articolo, dopo aver illustrato alcuni concetti base sul colore, sulla sua percezione da parte dell'uomo e sulle procedure di misurazione, si analizzano vantaggi e svantaggi delle diverse tecniche colorimetriche. Lo spazio colore CIEL\*a\*b\* risulta essere il più affidabile essendo quasi percettivamente uniforme e codificato da una organizzazione internazionale. Inoltre, esso consente una quantificazione esatta della distanza cromatica fra due campioni. Il sistema Munsell, efficace per il lavoro di campagna, non permette tale quantificazione. Comunque, per quest'ultimo è stata sviluppata una procedura che consente di ottenere la determinazione cromatica anche per la ghiaia.

Si è infine valutata, nello spazio CIEL\*a\*b\*, la compatibilità cromatica fra sabbie native e sabbie di ripascimento in alcuni interventi realizzati in Italia negli ultimi anni. Le differenze cromatiche ( $\Delta E^*ab$ ) trovate per alcuni casi di studio giustificano il disappunto espresso da numerosi utilizzatori delle spiagge in questione.

**Parole chiave:** spiagge, sedimenti, colore, ripascimenti artificiali.

### Abstract

*Artificial beach nourishment, which is increasingly being applied to shore protection projects, can significantly modify the original beach colour, therefore altering one of the most important coastal landscape components. Although in some cases stakeholders positively evaluated this change, frequently the use of sand of a different colour induced controversies which even resulted in court cases. Sand and gravel chromatic characterisation is a hard task due to their extremely low heterogeneity. This paper presents concepts on colour theory and perception, and describes some procedures that are suitable to such characterisation. CIEL\*a\*b\* is the most reliable colour space, being perceptually uniform and codified by an international organisation; in addition, it allows for the quantification of the distance between colours of two samples. The Munsell system, suitable for field work, makes it difficult to perform such a quantification. However, a procedure has been developed for the latter which allows to characterise gravel colours. The chromatic compatibility between native and borrow sediments from recent Italian nourishment operations was then evaluated using CIEL\*a\*b\* colour space. Chromatic differences ( $\Delta E^*ab$ ) justify stakeholders' disagreement with the realisation of some beach nourishments.*

**Keywords:** beaches, sediments, colour, beach fill.

## Introduzione

Il colore della sabbia è uno degli aspetti caratterizzanti il paesaggio costiero ed uno degli elementi che più influenzano la scelta di una località di vacanza da parte dei bagnanti, tanto che molti autori lo includono fra i parametri per la valutazione della qualità delle spiagge (Williams e Morgan, 1995; Leatherman, 1997; Morgan, 1999). Questa caratteristica è determinata dai minerali e dai frammenti litici che costituiscono l'arenile, provenienti in gran parte dai bacini di alimentazione, ma anche dall'erosione delle falesie e dai sedimenti presenti sulla piattaforma, nonché dai bioclasti prodotti in mare. La fama e la fortuna di alcune località turistiche è sancita, fra l'altro, proprio dal colore delle proprie spiagge; basti pensare alla spiaggia rosa di Budelli (Sardegna) e a quella di Lignano Sabbiadoro, toponimo entrato in uso dopo che in un depliant turistico degli Alberghi Riuniti, del 1931, veniva scritto *Lignano dalla sabbia d'oro*, proprio per richiamare l'attenzione sul colore dell'arenile di questa località del litorale veneto.

Ma il colore della sabbia ha una valenza ecologica assai più ampia, andando a determinare le caratteristiche termiche della sabbia (Hays et al., 2001), così importanti per alcuni organismi che hanno lì il proprio habitat permanente o stagionale. La temperatura della sabbia, e quindi il colore, incide ad esempio sul successo riproduttivo dei limuli (Avisar, 2006) e delle tartarughe marine; per quest'ultime, attraverso il tempo di sviluppo delle uova, è influenzata anche la *sex ratio* (Dickerson et al., 2006).

Il colore della sabbia può essere identico a quello delle rocce retrostanti, ma talvolta ha caratteristiche cromatiche assai diverse, determinate da un bacino di alimentazione che differisce per litologia dalla fascia costiera; spiagge di colore diversissimo possono trovarsi vicine, quando non in adiacenza (Wiegel, 2006) e la stessa spiaggia può cambiare di colore nell'arco dell'anno con il flusso *cross-shore* di materiali a granulometria o a peso specifico diverso (Prakash et al., 2007).

Nonostante ciò, il colore di una spiaggia è una caratteristica ambientale che si ritiene di dover conservare negli interventi di ripascimento degli arenili, anche se indicazioni specifiche in merito si ritrovano solo in pochi documenti (es. Ewing L., California Coastal Commission, 1997).

Questo può contrastare con le "richieste" dei frequentatori, che attribuiscono alle sabbie più chiare una valenza maggiore di quella riservata, ad esempio, alle sabbie grigio scure (Grove, 2007; Pranzini et al., 2008).

D'altra parte, i sedimenti chiari sono preferibili per svariati motivi: conferiscono luminosità al paesaggio, fanno apparire più trasparenti le acque costiere, si riscaldano meno sotto il sole estivo e, perché no, garantiscono un'abbronzatura accelerata. E' tale l'esigenza di mantenere il colore chiaro delle spiagge che lo posseggono, che è stata valutata l'ipotesi di sottoporre a trattamento chimico la sabbia grigia presente al largo di Oahu (Hawaii) in modo da sbiancarla prima della sua utilizzazione per il ripascimento della spiaggia (Hampton et al., 2004).

Vi sono comunque casi in cui un colore più scuro, ma caratteristico, è stato gradito dai frequentatori, come dimostra l'intervento effettuato a Cala Gonone, in Sardegna (Pacini et al., 1999): una esile spiaggia carbonatica, inserita fra nere rocce basaltiche, è stata ampliata con ghiaietto di granito rosa ed oggi viaggia per tutto il mondo grazie alle nuove cartoline del paese (Fig. 1). Il progetto, unico fra gli interventi di difesa costiera, ha ricevuto il Premio Mediterraneo per il Paesaggio nel 2000 (PMP, 2001). D'altra parte il colore rosa è considerato altrettanto pregiato del bianco nei questionari di valutazione delle spiagge (Leatherman, 1998).

È vero però che nella gran parte dei casi l'alterazione del colore naturale non è stata gradita, tanto che di ripascimenti artificiali si parla sempre più frequentemente nelle aule dei tribunali. La spiaggia di Cavo, all'Isola d'Elba, alimentata con i materiali di risulta dell'attività estrattiva del ferro (Nordstrom et al., 2004), ha assunto una colorazione rossiccia per la gran quantità di ossidi presenti, che hanno anche reso torbide le acque marine antistanti. La presenza di cristalli di ematite che brillavano sulla spiaggia, e che venivano raccolti in grande quantità dai visitatori, non ha compensato il disagio

di chi si trovava a camminare scalzo sui sedimenti spigolosi e arroventati dal sole. L'ipotizzato danno ambientale, in particolare sulla antistante prateria di *Posidonia oceanica*, si è dimostrato inesistente, ma il Comune di Rio Marina e la Provincia di Livorno hanno fatto un nuovo progetto ricoprendo con ghiaia grigia la spiaggia appena ricostituita.



Figura 1 - Una cartolina raffigurante la nuova spiaggia di granito rosa inserita fra le nere rocce vulcaniche del litorale di Cala Gonone (Sardegna).

Il caso della spiaggia del Poetto (Cagliari) è ancor più emblematico di quanto il colore della sabbia stia a cuore ai frequentatori abituali: qui la vecchia spiaggia di sabbia fine, e bianca per l'elevata percentuale di quarzo, si era notevolmente ridotta per i prelievi da terra e da mare e per la perdita dovuta all'ablazione eolica. Nonostante ciò il ripascimento da mare, con sedimenti scuri, più grossolani e con una prevalenza di bioclasti, ha ferito la sensibilità ambientale dei cagliaritari, innescando una nuova procedura penale (Pranzini, 2009).

Più recente è il caso del ripascimento effettuato a Marina Palmense (Bisci et al., 2008) sempre con sedimenti dragati in mare. In questo caso la spiaggia naturale era costituita da sedimenti chiari, in prevalenza carbonatici, mentre la nuova sabbia è scura tanto che il contrasto cromatico è evidente anche sulle immagini riprese dallo spazio (Fig. 2).

In tutti questi casi controversi, il colore dei nuovi materiali era più scuro di quello dei sedimenti naturali e non si sa se le critiche dei cittadini riguardino più la perdita di un colore "gradito" che non quella del colore "naturale". In un altro caso, sulla spiaggia di Ladispoli (Lazio), è stata versata sabbia più chiara di quella originaria e, anche se ciò non ha innescato vibranti proteste, alcune interviste hanno dimostrato che qui il gradimento per i sedimenti scuri è maggiore che altrove (Pranzini et al., 2008).

Trasformazioni analoghe hanno accompagnato anche alcuni ripascimenti effettuati all'estero, dove si sono importate sabbie di origine assai lontana. La spiaggia di St. George's Bay, a Malta, è stata alimentata con 5.000 m<sup>3</sup> di sabbia proveniente dalla Giordania (Ebejer, 2004), mentre il colore giallo della spiaggia di Las Teresitas, inserita fra le rocce nere vulcaniche di Tenerife, ricorda ai turisti meno sprovveduti la provenienza sahariana della sua sabbia.

I casi citati, indipendentemente dalle valutazioni che se ne danno, dimostrano che negli anni passati l'aspetto relativo al colore delle sabbie è stato sottovalutato nella progettazione dei ripascimenti artificiali ed ancora oggi sul Coastal Engineering Manual (Gravens et al., 2002) si legge: *compatibility*



*of borrow and native beach material is primarily based on grain size characteristics, and to a lesser extent on color.* La richiesta che emerge da parte degli organismi italiani preposti alla tutela dell'ambiente, di caratterizzare i sedimenti naturali e di ripascimento anche dal punto di vista cromatico, non può quindi che trovare il più ampio consenso, anche se il vincolo di rispettare il colore di una spiaggia dovrebbe essere posto laddove questo ha un'oggettiva valenza paesaggistica od ecologica. In ogni caso ciò che viene chiesto è la valutazione della "compatibilità cromatica" fra i sedimenti naturali e quelli di ripascimento, senza che venga spiegato cosa si intende per compatibilità cromatica. Inoltre, questa norma sembrerebbe escludere a priori la possibilità di conferire alla nuova spiaggia un colore "migliore" di quello del vecchio arenile.



Figura 2 - Il litorale di Marina Palmense, in una immagine di Google Earth, in cui si vede la spiaggia scura derivante dal recente ripascimento inserita in un tratto di costa caratterizzato da sedimenti chiari. Il rettangolo grigio in alto è il deposito della sabbia stoccata a terra in attesa di essere utilizzata in altri interventi.

Nel presente lavoro non ci occuperemo degli aspetti estetici del colore della sabbia e delle preferenze dei bagnanti in merito a ciò (argomento trattato da Pranzini et al. 2008) e limiteremo l'analisi ai problemi tecnici inerenti la determinazione della compatibilità cromatica dei sedimenti. Alla difficoltà di stabilire il colore di una sostanza eterogenea come la sabbia, o peggio ancora la ghiaia, si unisce infatti quella di stabilire quando due colori diversi possano essere definiti simili; cosa che può significare "indistinguibili" per un osservatore, oppure "accettabili" secondo una valutazione soggettiva basata su fattori fisiologici, psicologici e culturali.

### **Percezione e determinazione del colore**

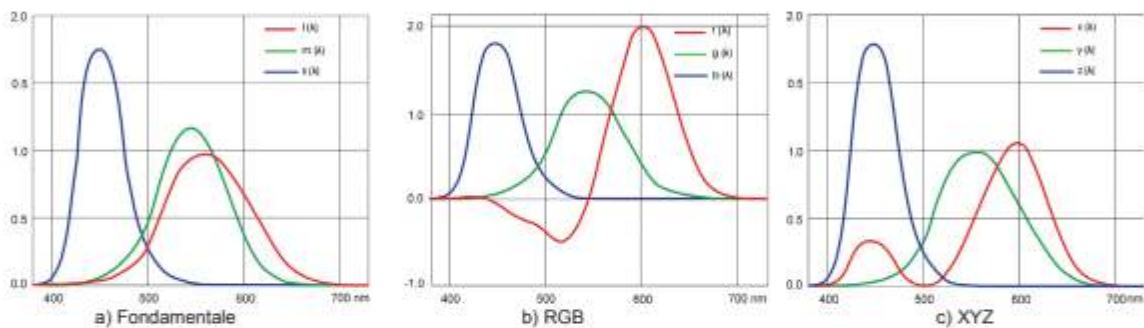
La Colorimetria è una scienza esatta che si occupa della determinazione quantitativa del colore facendo riferimento alla percezione umana, definendo anche i sistemi di rappresentazione e le procedure di misurazione più idonee a tale fine.

La percezione umana dei colori è materia che riguarda la fisiologia, anch'essa scienza esatta nonostante che la nostra valutazione del colore rimanga qualitativa e la misura dell'intensità luminosa sia resa difficile proprio da quegli adattamenti dell'occhio che ci consentono di vedere in condizioni di

illuminazione estremamente diverse.

Ciò non riguarda solo la luminosità complessiva di un oggetto, ma anche l'intensità della radiazione nelle diverse lunghezze d'onda, cosa che rende arduo il definire un *range* di colori entro il quale le differenze cromatiche non siano percettibili da un osservatore.

L'occhio umano ha due tipi di recettori, i coni, meno sensibili ma specializzati nella visione cromatica, e i bastoncelli, più sensibili ma con scarsa risoluzione spettrale. Paghiamo quindi la possibilità di vedere all'alba o al crepuscolo, o comunque in condizioni di scarsa illuminazione, perdendo la percezione dei colori. Di giorno tre tipi di coni diversi raccolgono separatamente la radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda compresa fra 380 e 780 nm, anche se fuori dal range 400 ÷ 700 nm la loro sensibilità è estremamente bassa. I coni *L* si attivano con le onde più lunghe, i coni *M* con quelle medie ed i coni *S* con quelle corte, sebbene vi sia una notevole sovrapposizione delle curve che descrivono il livello di attivazione dei tre coni in funzione della lunghezza d'onda, in particolare fra quella degli *L* e quella degli *M*. Le curve mostrano picchi di attivazione rispettivamente a 580, 540 e 440 nm e la sensibilità dei tre coni è diversa a parità di intensità luminosa (Fig. 3a).



**Figura 3 - Funzioni colorimetriche nei sistemi di riferimento Fondamentale, RGB (CIE 1931) e "immaginario" XYZ (CIE 1931).**

I valori di tristimolo indicano la proporzionalità fra stimoli di diversa radianza spettrale e livello di attivazione dei coni, tanto che è possibile associare ad un colore una posizione nello spazio *LMS*, dove il valore di ciascuna delle tre coordinate (*L*, *M*, *S*) è dato dall'integrale delle funzioni colorimetriche (*color-matching function*) per  $\lambda$  compreso fra 380 e 780 nm. Queste funzioni vengono normalizzate in modo che uno stimolo di uguale energia determini l'uguaglianza  $S = M = L = 1$ . È evidente che valori identici di *L*, *M* ed *S* possono essere ottenuti con intensità e distribuzioni spettrali diverse, e quindi che più stimoli diversi possano generare la stessa percezione cromatica (metamerismo). Dato che le tre curve non erano conosciute con sufficiente accuratezza nel momento in cui venivano definiti gli standard colorimetrici, lo spazio colore *LMS* non è mai stato utilizzato nella pratica (Boscarol, 2007).

Nel 1931, sulla base di numerosi test di *color matching* (confronto visivo fra un determinato colore e quello generato dalla sovrapposizione di tre stimoli primari) la *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) definì un *osservatore standard* e nuove funzioni di tristimolo "immaginarie" *RGB* (Fig. 3b) utilizzando come primarie luci monocromatiche di lunghezze d'onda pari a 700 (*R*), 546.1 (*G*) e 435.8 nm (*B*). Pur scegliendo opportunamente queste sorgenti primarie, non era comunque possibile ottenere con la loro sintesi additiva tutti i colori, ma per alcuni era necessario che uno dei tre primari venisse sottratto in quantità opportune (in modo artificioso aggiungendolo al colore di riferimento da uguagliare); inoltre, non tutti i colori percepiti dall'occhio potevano essere riprodotti in questo modo. Per rispettare la diversa sensibilità dei coni ai tre primari, le componenti tricromatiche furono definite attraverso le seguenti relazioni:



$$R = L_R \quad G = L_G/4,591 \quad B = L_B/0,060$$

in modo che per l'osservatore normale medio ogni miscuglio delle luci fondamentali nel quale  $R$ ,  $G$ ,  $B$  abbiano valori uguali, sia equivalente alla luce "bianca" convenzionale  $W$  (Feury e Mathieu, 1966).

Normalizzando i valori di  $R$ ,  $G$  e  $B$  si ha che i *coefficienti tricromatici*  $r$ ,  $g$  e  $b$  sono dati da:

$$r = R/(R+G+B) \quad g = G/(R+G+B) \quad b = B/(R+G+B)$$

da cui:

$$r + g + b = 1.$$

Conoscendo due dei tre coefficienti è quindi possibile ottenere il terzo, che è il complemento ad 1 della somma dei due. Ciò consente di rappresentare i colori su di un piano, essendo la terza coordinata determinata dalla luminanza totale del fascio.

Lo spazio RGB ha una grande importanza nelle applicazioni pratiche in quanto viene utilizzato in tutte le apparecchiature che producono immagini a colori (schermi televisivi, fotocamere digitali, ecc.), ma basandosi sull'uguagliamento metameroico dei colori, ogni produttore può adottare sistemi di riferimento diversi, e addirittura talvolta distorti, come è il sistema sRGB di Windows, in cui le terne  $R$ ,  $G$  e  $B$  subiscono elevazioni a potenza distruggendo così la linearità dello spazio (Oleari, 2003). Alcuni colori generati da un monitor non possono venire riprodotti da un altro o da una stampante, oppure non vengono riconosciuti da uno scanner; inoltre, la gamma di colori che il nostro occhio percepisce è assai più ampia di quella delimitata da qualsiasi spazio RGB. Ecco perché, insieme alla non linearità del sistema, di cui parleremo in seguito, non è possibile fare determinazioni colorimetriche assolute utilizzando foto digitali.

In realtà, metodi di "determinazione" del colore che utilizzano camere digitali sono stati sviluppati e alcuni di questi utilizzano tecniche e *software* tipici del telerilevamento (Levi et al., 2005), ma non hanno trovato vasta utilizzazione, anche se le foto digitali possono aiutare in alcune procedure di "comparazione" fra diversi campioni.

Nel caso si intenda utilizzare il sistema RGB, si può fare ricorso ai colorimetri prodotti appositamente ed utilizzati in campo industriale e merceologico, che direttamente o indirettamente forniscono anche queste coordinate colore. Bisogna però chiarire che su di esse non possono venire definite norme o prescrizioni, proprio perché spesso le coordinate RGB che vengono misurate dipendono da numerose variabili non codificate.

Le coordinate RGB calcolate sulla base di 30 letture con un colorimetro di fascia bassa (PCE RGB-1002) con lettura a 10 bit sul campione centrale di Figura 4 risultano essere pari a 222-201-156 (st. dev. 17, 17, 14), che riportate a 8 bit assumono i valori di 56-50-39, con rapporti piuttosto costanti con la terna 178/164/143 misurata a monitor (3,18, 3,28 e 3,67), ma con luminosità decisamente inferiore a quella dell'immagine fotografica.

Ma il problema principale dei vari sistemi RGB è che non sono "perceptivamente uniformi": differenze costanti nei valori delle 3 coordinate non producono nell'osservatore differenze costanti di percezione cromatica nelle diverse parti dello spazio RGB.

Facendo sempre riferimento all'*osservatore standard* CIE 1931, furono definite anche nuove funzioni di corrispondenze colore, denominate  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , legate alle  $R$ ,  $G$  e  $B$  da relazioni lineari, ma le cui coordinate  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  assumono solo valori positivi.

Fra le infinite trasformazioni lineari possibili fra i primari  $R$ ,  $G$  e  $B$  e i nuovi  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  se ne scelse una in cui il primario  $Y$  corrisponde alla risposta percettiva che il nostro occhio dà alla Luminosità, mentre le altre due forniscono la Cromaticità.



Figura 4 - Stima della omogeneità cromatica fra tre diversi campioni di sabbia utilizzata in un ripascimento profondo a Marina di Carrara. Unica foto scattata con i campioni e le scale cromatiche poste dietro ad un diffusore di luce solare (pannello di plexiglas bianco). L'immagine è stata poi sottoposta a stretch lineare in ciascuno dei canali RGB. E' stato quindi applicato un filtro "medio" alle tre aree rettangolari poste al centro di ciascun campione per generare il colore medio, le cui coordinate RGB sono riportate al centro. Le coordinate RGB hanno valore solo nell'ambito di un confronto all'interno dell'immagine stessa.

Le funzioni di *color matching* sono rappresentate in Figura 3c:  $X$  corrisponde approssimativamente al Magenta (con un picco a 600 nm, nel Rosso, ma con associato un picco secondario a 440 nm, ossia nel Blu);  $Y$  ha il picco a 521 nm (Giallo-Verde) e  $Z$  a 477 (Blu). Un colore viene così ad essere posizionato in uno spazio tridimensionale, non molto diverso dall'RGB e sempre basato sulla percezione dei coni  $S$ ,  $M$  e  $L$ , ma nel quale la gamma di colori rappresentabili è estremamente più ampia e copre tutti i colori che il nostro occhio riesce a vedere e senza la necessità di inserire "stimoli negativi".

Anche in questo caso è possibile normalizzare i tre primari in modo che la loro somma sia sempre pari ad uno, al fine di rappresentarne una coppia su di un piano e derivare per differenza il terzo valore. L'intersezione del piano di massima Chiarezza con lo spazio XYZ contiene tutti i colori percettibili nella loro massima luminosità. Questi occupano una parte del piano  $X,Y$  che viene ad avere la forma di un ferro da stiro con un lato più incurvato dell'altro (Fig. 5), sul cui perimetro si trovano i colori spettrali con lunghezza d'onda crescente in senso orario, mentre sulla base rettilinea vi è una miscela che dal rosso puro porta al blu puro. Il diagramma delle Cromaticità ha delle caratteristiche particolari: a) mescolanze additive di due stimoli di colore diverso con pari luminosità producono una percezione cromatica che si trova sulla metà del segmento congiungente i due colori; b) la percezione cromatica fornita dalla mescolanza di tre colori diversi si colloca all'interno del triangolo che ha per vertice i tre colori.



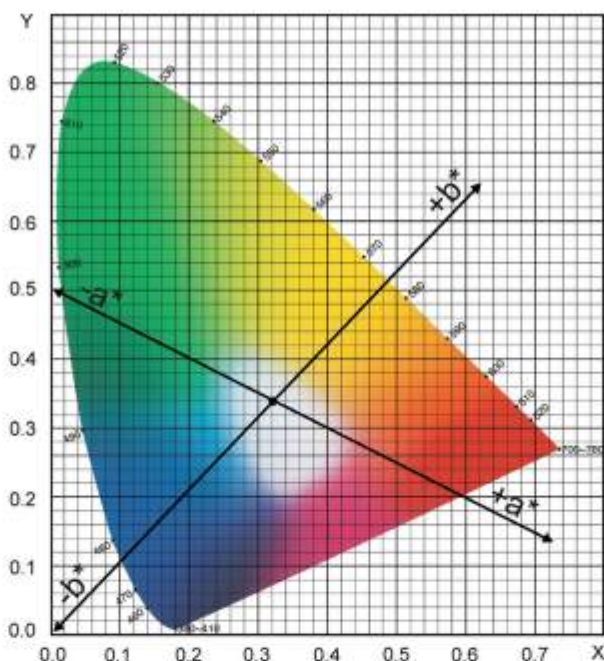


Figura 5 - Diagramma delle Cromaticità CIE 1964. Sono indicati anche gli assi  $a^*$  e  $b^*$  del sistema CIEL\*a\*b\* 1976.

Un altro sistema colorimetrico frequentemente utilizzato nell'elaborazione delle immagini digitali è l'HSB (Hue, Saturation, Brightness; Fig. 6) che meglio si presta a descrivere i colori nel modo in cui noi li vediamo e a manipolarli secondo i nostri schemi mentali che, contrariamente al fatto che percepiamo in RGB, non si basano su tale sistema di coordinate; è per questo che molti professionisti del colore (fotografi, grafici pubblicitari, ecc.) utilizzano software di fotoritocco che consentono di lavorare in HSB. Rimane il fatto che anche questo sistema, derivando dall'RGB, non è percettivamente uniforme anche se si avvicina maggiormente a questa caratteristica.

Hue (Tinta) è il colore come generalmente lo descriviamo (rosso, giallo, verde, ciano, blu, magenta) e nello spazio HSB assume un valore angolare che determina la posizione del punto-colore su di una circonferenza. La Saturazione misura quanto un colore è diverso da un grigio di pari luminosità; i valori vanno dal grigio puro ( $S = 0\%$ ) fino alla massima saturazione del colore puro ( $S = 100\%$ ) ed è rappresentata dalla distanza del punto-colore dal centro del cerchio. La Brightness (Luminosità) esprime la posizione dei colori desaturati ( $S = 0$ ) in una scala di grigi, con valori compresi fra 0 e 100; a 0 qualunque colore appare nero, mentre a 100 appare bianco. La sua rappresentazione avviene sull'asse ortogonale al cerchio che viene intersecato dal livello  $L = 50$ .

Lo spazio HSB ha la forma di un fuso che si restringe alle due estremità con la punta superiore bianca e quella inferiore nera. Sistemi analoghi sono l'HLS (Hue, Lightness, Saturation) e l'LCH (Lightness, Chroma, Hue).

Il problema è che anche questi sistemi non rispettano la progressività con la quale il nostro occhio, o meglio il nostro cervello, percepisce le differenze cromatiche; non sono quindi percettivamente uniformi. La CIE, sempre partendo dallo spazio XYZ, cercò di sviluppare nuovi spazi colore percettivamente uniformi. Nel 1960 fu proposto un diagramma di Cromaticità  $u, v$  con una espansione del settore rosso e compressione di quello verde, per tenere conto della diversa capacità di discriminazione dell'occhio in questi colori. Nel 1976 il diagramma  $u, v$  venne modificato moltiplicando per 1.5 il valore di  $v$ , estendendo quindi il passaggio dal blu al verde. Anche l'asse Y, nel quale si riporta la luminosità, venne riscaldato per farlo corrispondere alle differenze di percezione dell'occhio alla luminosità e denominato  $L^*$ : lo spazio CIELUV 1976 è quasi-percettivamente uniforme.

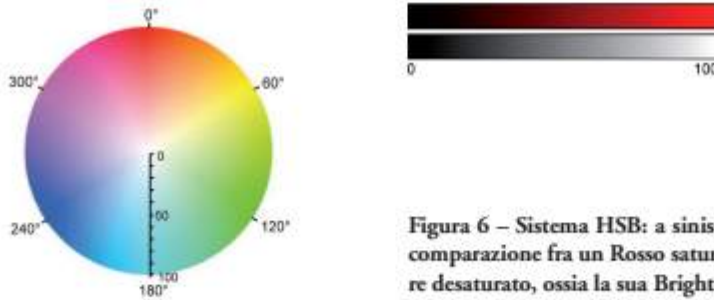


Figura 6 – Sistema HSB: a sinistra il piano HS e in alto l'esempio della comparazione fra un Rosso saturo con diversa Brightness e lo stesso colore desaturato, ossia la sua Brightness.

Negli anni '60 Edwald Hering osservò che non vi sono blu giallastri o gialli bluastrì, così come non vi sono verdi rossastri o rossi verdastri. Pensò così che nel tragitto fra l'occhio e il cervello i tre stimoli primari vengano trasformati in tre diverse percezioni, una di luminosità (*chiaro-scuro*) e due legate a coppie di colori opposti: *rosso-verde* e *blu-giallo*. Questa Teoria di Hering portò alla definizione di un secondo sistema CIE quasi-percettivamente uniforme e basato su due nuovi assi  $a^*, b^*$ <sup>1</sup> tracciati sul diagramma delle Cromaticità in modo che intersechino la linea dei colori spettrali proprio in corrispondenza di quattro colori opposti (Fig. 5). La posizione che assumono su di essi i vari punti colore deriva da una trasformazione delle coordinate  $x$  ed  $y$  che portano  $a^*$  e  $b^*$  ad assumere valori compresi fra  $\pm 200$ . Nella posizione  $a^* = b^* = 0$  viene intersecato l'asse della Chiarezza ( $L^*$ ), definito nello stesso modo visto per il sistema CIELUV, e sul quale si trovano i colori acromatici (dal bianco, ai vari grigi, fino al nero).

I valori positivi di  $a$  vanno verso il rosso, mentre quelli negativi verso il verde; parimenti, valori positivi di  $b$  esprimono colori che vanno verso il giallo e quelli negativi colori che portano al blu.

Il sistema CIEL\*a\*b\* (Fig. 7) è quello che oggi viene più frequentemente utilizzato per la misura del colore, ed in particolare per la determinazione della differenza fra due colori, che corrisponde alla distanza euclidea fra le loro coordinate:

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

La non completa uniformità del sistema richiede alcune correzioni che sono oggetto di costante sviluppo (Oleari, 2008).

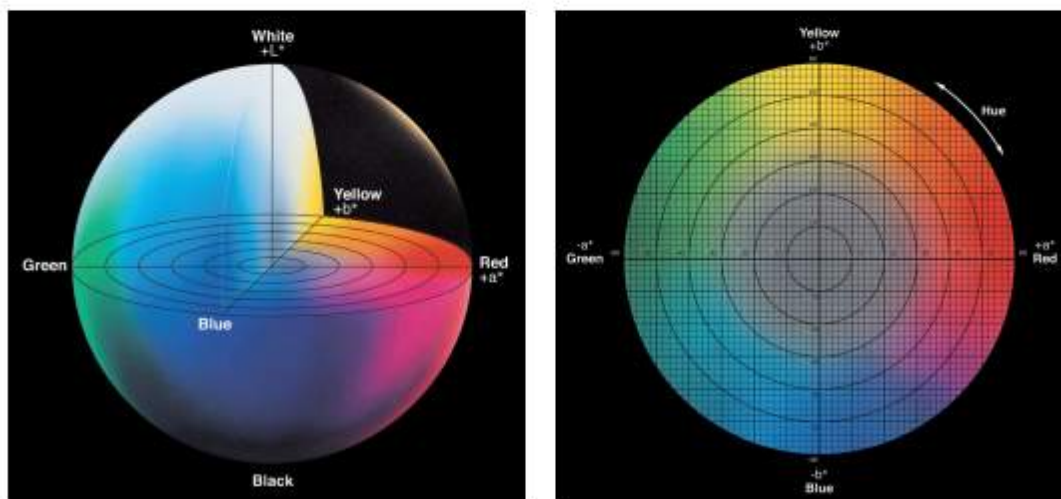


Figura 7 - Lo spazio CIEL\*a\*b\* e il diagramma di Cromaticità  $a^*, b^*$ .

<sup>1</sup> Gli asterischi sono parte integrante del nome del sistema ed indicano la non linearità delle coordinate, oltre che distinguere questo sistema dal Lab, introdotto da Hunter nel 1948 e derivante, anch'esso, dallo spazio CIE 1931 XYZ.



Tutti questi sistemi, dallo HSB al CIEL\*a\*b\*, vanno nella direzione che già nel 1898 aveva intrapreso Alber Henry Munsell, un insegnante di disegno che, nel 1905, pubblicò *A Color Notation*, un atlante in cui i colori venivano posti in una sequenza "razionale" (*perceptually uniform color space*). Il sistema ideato da Munsell, successivamente modificato per correggere alcuni ovvi errori nel posizionamento di alcuni colori (Malacara, 2002) e chiamato ora *Munsell Renotation System*, ha avuto un immenso successo ed è stato adottato, fra l'altro, per la descrizione del colore dei suoli (*Munsell Soil Color Charts*). Ad esso fa riferimento, ad esempio, la California Coastal Commission (1997) per la determinazione del colore delle sabbie native e di ripascimento; caratterizzazioni su tale sistema vengono da poco richieste anche in Italia da alcune Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale (es. ARPAT).

Anche questo sistema, analogamente a quelli precedentemente descritti, fa riferimento al modo con il quale vengono denominati i colori nel linguaggio comune, indicando un colore dominante (Hue), una luminosità (Value) e una saturazione (Chroma) (Fig. 8).

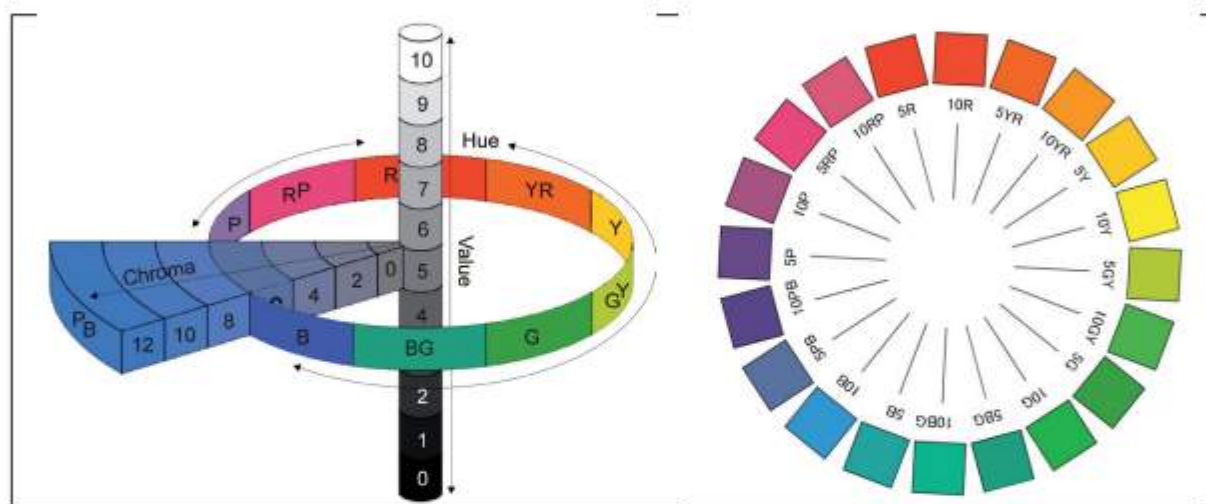


Figura 8 - Il sistema colorimetrico Munsell (a sinistra) e la posizione delle Tinte (Hue) sulla circonferenza (a destra).

Teoricamente lo spazio è cilindrico, con l'asse verticale corrispondente alla sensazione di Luminosità fornita da un colore, con in alto il Bianco (Value 10), al centro il Grigio (Value 5) e in basso il Nero (Value 0). Come abbiamo già detto, la nostra percezione della luminosità non segue in modo lineare le variazioni di intensità luminosa e Munsell cercò di scalare i livelli di Value in modo opportuno, con una progressione che si colloca fra la radice quadrata e la radice cubica della riflettività, tanto che una Value di 5 corrisponde ad una riflettanza di 0.2.

La Tinta (Hue) è ciò che genericamente definiamo Colore e viene ad assumere una coordinata polare con le 5 Hue principali Porpora (P), Blu (B), Verde (G), Giallo (Y), Rosso (R), poste ad intervalli regolari, suddivisi ulteriormente a generare 5 combinazioni (PB, BG, GY, YR, RP) divise poi in 10 sottoclassi. Procedendo verso il centro del cerchio si va verso l'asse della luminosità (Value) ed i colori saturi diventano progressivamente grigi; questa coordinata è definita Chroma o Saturazione. Lo spazio HVC effettivamente occupato dai colori Munsell non è cilindrico, sia perché alcuni colori forti, come il Rosso e il Blu, raggiungono la saturazione ad alti valori di Chroma, mentre altri, come il Giallo e il Verde, la raggiungono non lontano dall'asse verticale dei grigi, sia perché spostandosi verso le estremità dell'asse della Value (Bianco e Nero) si riducono, fino ad azzerarsi, i valori di Chroma. La precisione con la quale può essere caratterizzato visivamente un colore con il sistema Munsell è stimata in 0.5 Hue, 0.1 Value e 0.4 Chroma (ASTM D1535).

Sebbene il sistema sviluppato da Munsell ben si adatti al modo con il quale percepiamo i colori e cerchi di compensare la non linearità della risposta del nostro occhio alle variazioni cromatiche (vorrebbe quindi essere un sistema percettivamente uniforme), non consente una facile identificazione dei colori equidistanti da uno di partenza.

Una volta definito il sistema colorimetrico di riferimento, rimangono da stabilire le condizioni di illuminazione della sabbia sotto le quali eseguire le misure, dato che ciascun oggetto colorato ha una riflettività specifica per ogni lunghezza d'onda e l'energia in arrivo al sensore o all'occhio dipenderà non solo da essa (il dato di nostro interesse), ma anche dall'intensità luminosa della sorgente in quella lunghezza d'onda. Il problema si presenta particolarmente complesso quando la determinazione avviene per via comparativa, come nel caso di utilizzazione delle Tavole Munsell. Per i sistemi CIE, l'evoluzione della determinazione degli spazi colore è andata di pari passo con quella della definizione di sorgenti luminose standard (illuminanti), fra le quali la D65 (CIE, 1965) è la più indicata per il nostro caso, simulando l'illuminazione solare con temperatura di emissione pari a 6504 K e cielo sereno, ossia le condizioni più frequenti ed omogenee di illuminazione e nelle quali anche il nostro occhio percepisce meglio le variazioni di cromaticità e di luminosità. Assai simile è l'Illuminante C (temperatura colore 6774 K), che taglia però le lunghezze d'onda dell'ultravioletto, ma che viene utilizzato nel sistema Munsell. L'Illuminante A (temperatura colore 2856 K) con uno spettro prodotto da una lampada ad incandescenza, e quindi con tonalità rosse, non è utilizzabile per la determinazione del colore di oggetti che stanno all'aperto; cosa che ci suggerisce di non effettuare comparazioni con le Tavole Munsell nel chiuso del nostro laboratorio illuminato, in genere, da simili lampade.

### **La caratterizzazione colorimetrica dei sedimenti**

Indipendentemente dal sistema scelto per rappresentare e confrontare le coordinate colorimetriche dei sedimenti da analizzare, rimane il problema relativo alla misura diretta o indiretta dei tre valori che identificano il colore di ogni campione.

Il primo problema che si pone riguarda il fatto che i sedimenti presentano una rugosità intrinseca, data dalla loro granulometria, che non può essere eliminata spianando la superficie da misurare. Studi effettuati sui materiali chimicamente omogenei indicano che la riflettività cala rapidamente all'aumentare delle dimensioni dei granuli (Stoner e Baumgardner, 1980). Ciò significa che una sabbia ed una ghiaia della stessa composizione mineralogica vengono ad avere un'albedo diversa e la sabbia apparirà più chiara della corrispondente ghiaia.

Inoltre, questo fenomeno non si presenta con la stessa intensità per tutti i colori, ma per le componenti dello spettro elettromagnetico a lunghezza d'onda maggiore la stessa superficie sarà più liscia di quanto non lo sia per le lunghezze d'onda minori.

Oltre a ciò, la superficie di una spiaggia, in particolare se costituita da ghiaia, non è lambertiana, ossia non mantiene la stessa riflettività nelle diverse lunghezze d'onda al variare dell'angolo di illuminazione e di osservazione. Ciò diventa ancor più grave in quanto la misura o il confronto viene generalmente fatto con visione zenitale. Se l'illuminazione non è coassiale, cosa tecnicamente impossibile, nel campo di vista appaiono le ombre dei granuli, tanto più estese quanto più angolata è la posizione della sorgente luminosa.

Misure fatte in condizioni di illuminazione naturale si portano dietro il problema dello scattering atmosferico: per la luce blu abbiamo una illuminazione diffusa dal cielo, e quindi una riduzione delle ombre, mentre nel verde ed ancor più nel rosso la luce proviene direttamente dal Sole e genera ombre blu, mentre la superficie illuminata riceve una radiazione con una prevalenza della componente rossa.

I colorimetri professionali hanno una sorgente luminosa interna che, tramite una calibratura su di un pannello "bianco", viene a simulare l'Illuminante richiesto, in genere il C e il D65.



In alcuni strumenti la sorgente luminosa è costituita da due led posti lateralmente, mentre il sensore guarda la scena dall'alto. Ciò dovrebbe ridurre i problemi legati alla rugosità, ma i singoli granuli possono disporre le proprie superfici in modo da riflettere o meno la luce incidente verso il sensore. Strumenti più precisi forniscono un'illuminazione che proviene in modo uniforme da tutte le direzioni, consentendo determinazioni assai più accurate.

Ai fini della caratterizzazione colorimetrica dei sedimenti di spiaggia il problema appare marginale, dato che l'effetto della rugosità si ripercuote anche sul colore percepito da un osservatore, il quale vedrà colori leggermente diversi osservando la spiaggia secondo angoli diversi rispetto alla direzione del Sole. Rimane comunque il problema che la finestra del sensore deve aderire alla superficie da misurare, in modo da evitare l'ingresso della luce dell'ambiente. Con sabbie grossolane, granuli e ghiaia questo non è facile e si consiglia quindi di effettuare le misure in una stanza buia, anche se i colorimetri professionali forniscono un'illuminazione di intensità talmente superiore a quella dell'ambiente da rendere il problema esclusivamente teorico. Affondare lo strumento nella sabbia comporta che essa entra nella finestra e, nel caso in cui questa sia di dimensioni ridotte, va a formare una collinetta modificando sostanzialmente la geometria del sistema sorgente-superficie-sensore, fino ad avere la sommità nera di un cono illuminato lateralmente. Si rende quindi necessario operare con strumenti di grande apertura in modo da rendere ininfluenti le variazioni della superficie che si verificano sui bordi, che comunque spesso sono esclusi dal campo di misura. Anche in questi casi è però opportuno non affondare lo strumento nella sabbia, per mantenere costanti le distanze sorgente-superficie e superficie-sensore; in alternativa il paraluce può essere dotato di un vetro (ovviamente con caratteristiche speciali) che consente di affondare la testa dello strumento nella sabbia garantendo la costanza della geometria del sistema.

Nella determinazione del colore con le Tavole Munsell (Fig. 9) il problema è più grave, dato che la comparazione non può essere fatta altro che con luce laterale, essendo l'operatore posto davanti alla tavola e al campione. La percezione del colore sarà quindi analoga a quella di un osservatore che si rechi sulla spiaggia quando il Sole è lontano dallo zenit. La sabbia appare più scura di quanto non risulti a chi vi si reca d'estate nelle ore centrali della giornata.

Questo problema può essere in parte risolto ponendo dei pannelli diffusori, necessariamente bianchi, sul lato opposto al Sole in modo che ne riflettano la luce sul campione.

Le Tavole Munsell hanno in genere una finestra di circa un centimetro e in questo campo di osservazione si vengono a trovare tanti più granuli quanto più piccole sono le loro dimensioni. Nel campo delle sabbie molto fini, fini e medie ( $0.063 \div 0.50$  mm) l'occhio media automaticamente i vari contributi e la determinazione è relativamente semplice, ma per le sabbie grossolane e molto grossolane ( $0.5 \div 2.0$  mm), nonché per i granuli, i singoli granelli vengono percepiti indipendentemente e l'integrazione diventa più difficile. All'aumentare delle dimensioni il numero ridotto di granuli osservabili attraverso la finestra comincia a non essere significativo e confronti fatti in punti diversi possono portare a colori differenti. Il problema è assai più grave quando si devono caratterizzare delle ghiaie ( $2 \div 64$  mm) dato che vengono ad avere dimensioni comparabili con quelle della finestra, tanto che si può essere nelle condizioni di dover determinare un granulo per volta e non è ovviamente possibile fare poi una media fra i colori ottenuti.

Per superare questo problema abbiamo sviluppato un metodo semplice ma efficace che consiste in un contafile, con distanza focale di 4 cm, posto sulla pagina delle Tavole Munsell in corrispondenza della finestra che ci interessa usare. Il tutto poggia su di una struttura che consente di posizionare il campione di ghiaia su di un vassoio posto alla distanza di un metro, in modo da vederlo completamente sfocato attraverso la lente. In questo modo si vede il colore medio di una superficie di circa  $300 \text{ cm}^2$ , entro la quale cade un numero sufficiente di granuli per fornire un risultato significativo (Fig. 10).

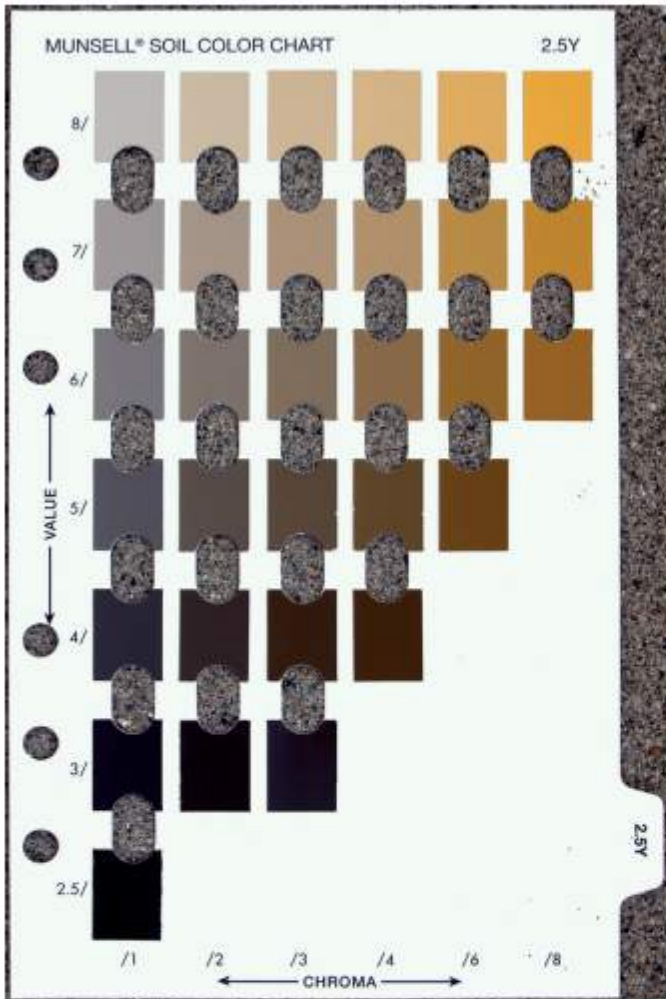


Figura 9 - Tavola Munsell 2.5Y sovrapposta alla sabbia della spiaggia di Marina di Carrara, che dalla comparazione viene ad avere una notazione di 2.5Y 7/2.5 (N.B.: i colori nella figura non rispettano la realtà).

La stessa struttura consente di fotografare la tavola e, sullo sfondo, attraverso la finestra il campione sfocato, avendo l'accortezza di usare la massima apertura per avere la minima profondità di campo, cosa facilmente ottenibile anche con un obiettivo macro o una lente addizionale (Fig. 10).



Figura 10 - Ghiaia con granuli di dimensioni comprese fra 0.3 e 20 mm (a sinistra) e lo stesso campione fotografato da 1 m di distanza con interposta una Tavola Munsell usata come piano di messa a fuoco.



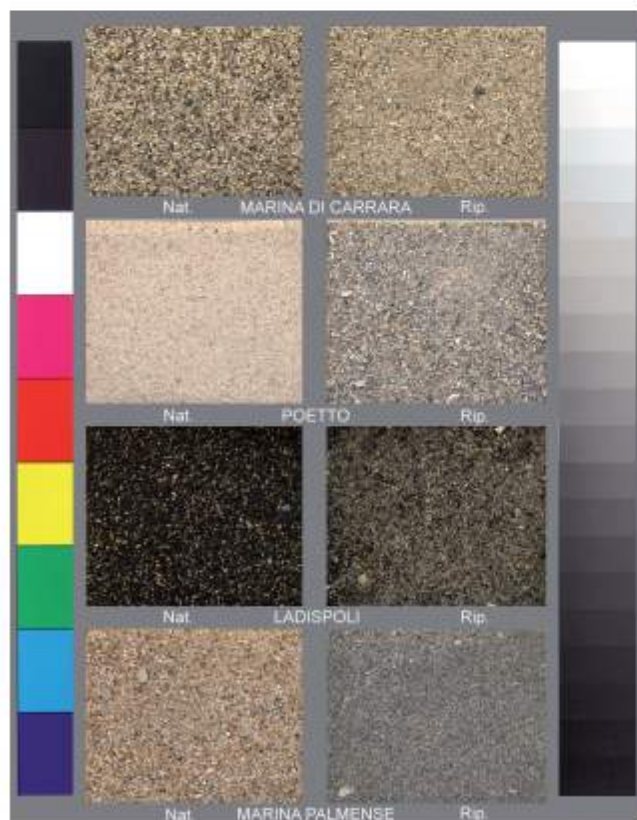
### Sulla compatibilità cromatica di alcune sabbie utilizzate per il ripascimento dei litorali in Italia

Al fine di porre le basi per una più ampia discussione sul concetto di “compatibilità cromatica” sono state analizzate sabbie di ripascimento utilizzate in alcuni interventi effettuati in Italia e il loro colore confrontato con quello dei sedimenti nativi (Figura 11). In alcuni casi non è stato possibile avere un campione del materiale originario o di quello versato e si è supplito a questa carenza prelevando, nel primo caso, un campione su di un tratto di litorale adiacente e sopraflutto, nella speranza di una contaminazione minima, nel secondo campionando la spiaggia dopo il ripascimento, anche se è possibile che vi sia stato un modesto rimescolamento fra i due sedimenti. In ogni caso ciò che importa è quantificare le differenze fra i due materiali e nel caso di contaminazioni le differenze cromatiche vengono sottostimate.

La determinazione del colore nello spazio CIEL\*a\*b\* (D65) è stata effettuata con un colorimetro Konica Minolta CR-410 le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 1. Le coordinate CIEL\*a\*b\* delle coppie di campioni (Tab. 2) sono state quindi rappresentate sia con i loro valori assoluti (Figura 12 col. sinistra) che nelle loro differenze (Figura 12, col. destra). In Tabella 2 è riportata anche la notazione Munsell misurata direttamente con lo stesso strumento, ma utilizzando l'Illuminante C.

**Tabella 1 - Caratteristiche tecniche del colorimetro Minolta Konica Cr-410.**

Illuminazione/Visualizzazione	Diffusa/Angolo 0°	Ripetibilità	Dev. St entro $\Delta E^*ab$ 0,07
Rilevatore	6 Fotocellule al Silicio	Accordo interstrumentale	$\Delta E^*ab$ : entro 0,8
Sorgente luminosa	Lampada pulsata allo Xeno	Osservatore	Osservatore standard CIE 2°
Area di misura/illuminazione	Ø 50 mm / Ø 53 mm	Ripetibilità	Dev. St entro $\Delta E^*ab$ 0,07



**Figura 11- Sabbia naturale e di ripascimento dei quattro interventi presi in considerazione. Unica foto scattata con i campioni e le scale cromatiche poste dietro ad un diffusore di luce solare (pannello di plexiglas bianco). L'immagine è stata poi sottoposta a stiramento lineare in ciascuno dei canali RGB. (N.B.: i colori a stampa non rispecchiano quelli naturali).**

**Tabella 2 - Notazioni Munsell e coordinate CIEL\*a\*b\* dei campioni di sabbie naturali e di ripascimento. Le ultime quattro colonne indicano le differenze cromatiche nei tre assi e assolute.**

		Munsell	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	$\Delta L^*(D65)$	$\Delta a^*(D65)$	$\Delta b^*(D65)$	$\Delta E^*ab (D65)$
Marina Palmense	Nativo	0.8 Y 5.6 /2.1	58.05	3.43	14.24	-5.85	-3.20	-8.69	10.95
	Rip.	4.9 Y 5.1 /0.8	52.21	0.23	5.56				
Marina di Carrara	Nativo	3.0 Y 4.6 /1.2	48.01	0.72	8.44	7.30	-0.02	2.31	7.66
	Rip.	4.3 Y 5.4 /1.5	55.31	0.70	10.75				
Ladispoli	Nativo	4.3 Y 3.0 /0.7	29.75	0.76	5.00	10.31	-0.11	2.57	10.63
	Rip.	5.0 Y 3.9 /1.0	40.06	0.65	7.56				
Poetto	Nativo	3.3 Y 5.4 /0.9	67.38	1.65	10.00	-11.89	-0.76	-3.81	12.51
	Rip.	0.8 Y 6.6 /1.4	55.49	0.88	6.19				

### ***Il ripascimento della spiaggia di Marina di Carrara (Toscana)***

Il ripascimento della spiaggia di Marina di Carrara è stato effettuato fra il 2006 e il 2007 utilizzando 71.000 m<sup>3</sup> di sabbia proveniente da una cava fuori alveo nella pianura padana (Brescello). La sabbia è stata stesa prevalentemente sulla spiaggia emersa su di un fronte di circa 300 m, e il flusso sedimentario diretto verso sud ha determinato una riduzione della spiaggia di progetto e la crescita dei settori posti sottoflutto, ma la parte alta della spiaggia mantiene ancora in superficie i sedimenti versati (Ferri et al., 2008).

La sabbia naturale e quella di ripascimento hanno caratteristiche cromatiche leggermente diverse, come appare dai dati di Tabella 2 e di Figura 12, ma solo coloro che frequentano assiduamente la spiaggia ed hanno seguito i lavori, come gli operatori balneari, hanno notato la differenza descrivendo la nuova sabbia come più gialla di quella originale, mentre la gran parte degli ospiti estivi non si è accorta del cambiamento (Pranzini et al., 2008).

Ricordando che la precisione con la quale può essere determinato il colore con il sistema Munsell è di circa 0,5 Hue, 0,1 Value e 0,4 Chroma, si conferma che le due sabbie sono visivamente diverse.

Nel sistema CIEL\*a\*b\* una distanza cromatica ( $\Delta E^*ab$ ) pari ad 1 non è apprezzabile da un osservatore,  $\Delta E^*ab$  compresa fra 1 e 3 è apprezzabile, in particolare con confronto diretto, mentre per valori di  $\Delta E^*ab > 3$  i colori sono percepiti come decisamente diversi. Nel nostro caso il valore di  $\Delta E^*ab$  è pari a 7.66 e quindi la sabbia di ripascimento risulta effettivamente diversa da quella naturale. La differenza è sostanziale in termini di Chiarezza (+7.30), è praticamente uguale sull'asse *a* (Rosso - Magenta) (-0.02) e risulta sensibilmente più spostato verso il giallo nell'asse *b* (Verde - Giallo) (+2.31). Ciò conferma la percezione avuta dagli operatori locali, ma pone non pochi problemi circa la capacità di "ricordare" i colori, evidentemente assai meno spiccata rispetto a quella della discriminazione, dato che gli ospiti estivi non hanno notato differenze.

Fra i 4 casi esaminati, questo è quello che ha determinato la variazione cromatica minore, seppure rilevante, ma spostando il colore verso il giallo ed aumentando la Chiarezza, ha prodotto una spiaggia che, secondo le indagini di gradimento condotte da Pranzini et al. (2008), dovrebbe essere più apprezzata dai bagnanti.

### ***Il ripascimento della spiaggia del Poetto (Cagliari)***

La spiaggia del Poetto, come abbiamo visto, è stata oggetto, nel 2002, di un ripascimento con sedimenti dragati in mare sulla piattaforma antistante per un volume di circa 385.000 m<sup>3</sup>. I sedimenti erano costituiti da una consistente frazione di bioclasti grigi ed avevano all'interno anche elementi di granulometria maggiore di quella naturale della spiaggia, anche se l'erosione del litorale aveva determinato un progressivo arricchimento selettivo di ciottoli e ghiaia provenienti non solo da strati inferiori, ma anche da materiale di risulta da demolizioni "scambiato" con la sabbia bianca quarzosa negli anni della ricostruzione post-bellica di Cagliari (Pranzini, 2009).



La determinazione colorimetrica del materiale originario non è stata possibile in quanto, al momento del campionamento della spiaggia, era già stato effettuato il ripascimento. Si è quindi prelevato un campione sulla duna presente al margine della zona d'intervento, il cui colore dovrebbe essere quello della componente sabbiosa che era prevalente sulla spiaggia del Poetto prima del ripascimento. Il materiale riportato risulta avere un colore decisamente diverso da quello originario ( $\Delta E^*ab = 12.51$ ), ma questa differenza è dovuta essenzialmente alla minore luminosità ( $\Delta L^* = -11.89$ ) e secondariamente ad uno spostamento verso il blu lungo l'asse  $b$  ( $\Delta b^* = -3.81$ ), mentre sull'asse rosso-verde la differenza è minima ( $\Delta a^* = -0.70$ ).

Fra i quattro casi studiati è quello che presenta la maggiore distanza cromatica fra il sedimento naturale, se rappresentabile dalla duna, e quello di ripascimento. È una distanza che non è stata accettata dai tradizionali fruitori di questo litorale, prevalentemente abitanti di Cagliari che utilizzano questa come una spiaggia urbana, non tanto per la diversa Cromaticità quanto per la minore Chiarezza. È comunque doveroso segnalare che le obiezioni dei frequentatori hanno riguardato anche le dimensioni dei sedimenti, qui non prese in considerazione, ma che potrebbero avere fatto aumentare il rifiuto di questo intervento nella sua globalità.

### ***Il ripascimento della spiaggia di Marina Palmense (Marche)***

Il ripascimento della spiaggia di Marina Palmense (Bisci et al., 2008) è stato effettuato nel 2007 con sedimenti dragati in una cava marina data in concessione, caso unico in Italia, ad una società privata, la Arenaria srl. Una prima fase di dragaggio ha comportato lo stoccaggio a terra di 500.000 m<sup>3</sup> di sabbia (Fig. 2) di cui 30.000 m<sup>3</sup> sono stati subito utilizzati per il ripascimento di circa 320 m di spiaggia posta 550 m a sud del sito di stoccaggio. In questo caso la spiaggia naturale era costituita da sedimenti grossolani chiari, in prevalenza carbonatici, mentre la nuova sabbia è fine e scura, derivando da antichi depositi del Po oggi sommersi al centro dell'Adriatico (Paltrinieri, 2007); il contrasto cromatico è evidente anche sulle immagini di Google Earth (Fig. 2).

Le dimensioni ridotte dei nuovi sedimenti hanno favorito un loro rapido allontanamento dalla spiaggia emersa, ma i materiali scuri con livelli conchiliari formano ancora un terrazzo nella parte più interna della spiaggia.

Anche in questo caso il nuovo colore ha trovato non pochi oppositori, nonostante che la spiaggia originaria non avesse quelle caratteristiche di qualità riscontrate al Poetto. Il confronto dei nuovi sedimenti con la frazione sabbiosa originaria mostra una differenza ( $\Delta E^*ab$ ) pari a 10.95, e quindi leggermente inferiore a quella registrata al Poetto, ma in questo caso a fronte di una Chiarezza non molto minore ( $\Delta L^* = -5.85$ ) vi sono le coordinate cromatiche diverse, con  $\Delta a^* = -3.20$  e  $\Delta b^* = -8.69$ ; le nuove sabbie sono quindi un po' più scure e con tonalità tendenti al ciano rispetto ai sedimenti originari.

### ***Il ripascimento della spiaggia di Ladispoli (Lazio)***

Il litorale di Ladispoli è alimentato naturalmente dai corsi d'acqua che drenano le vulcaniti laziali ed è quindi caratterizzato da una colorazione tendente al nero. L'erosione a cui era soggetto da decenni ha imposto la realizzazione di opere di difesa e di un ripascimento artificiale effettuato nel 2003 con 485.000 m<sup>3</sup> di sabbia (De Angelis e Venzi, 2006). I sedimenti utilizzati provengono dalla cava sottomarina di Anzio, già sfruttata per altri interventi che hanno trovato il consenso dei vari soggetti interessati, come ad esempio ad Ostia, dove la colorazione più chiara rispetto alla sabbia naturale è stata apprezzata. A Ladispoli questo colore contrasta maggiormente con quello naturale e lo "sbiancamento" della spiaggia non è stato gradito da una consistente parte (21%) dei tradizionali frequentatori (De Angelis e Venzi, 2008).

Per questa spiaggia non avevamo a disposizione né un campione del sedimento nativo, né uno di quello di ripascimento; il primo è stato sostituito con uno prelevato 1 km sopraflutto alla zona di versamento, mentre il secondo è rappresentato dalla sabbia ancora presente nella parte alta del profilo di spiaggia.

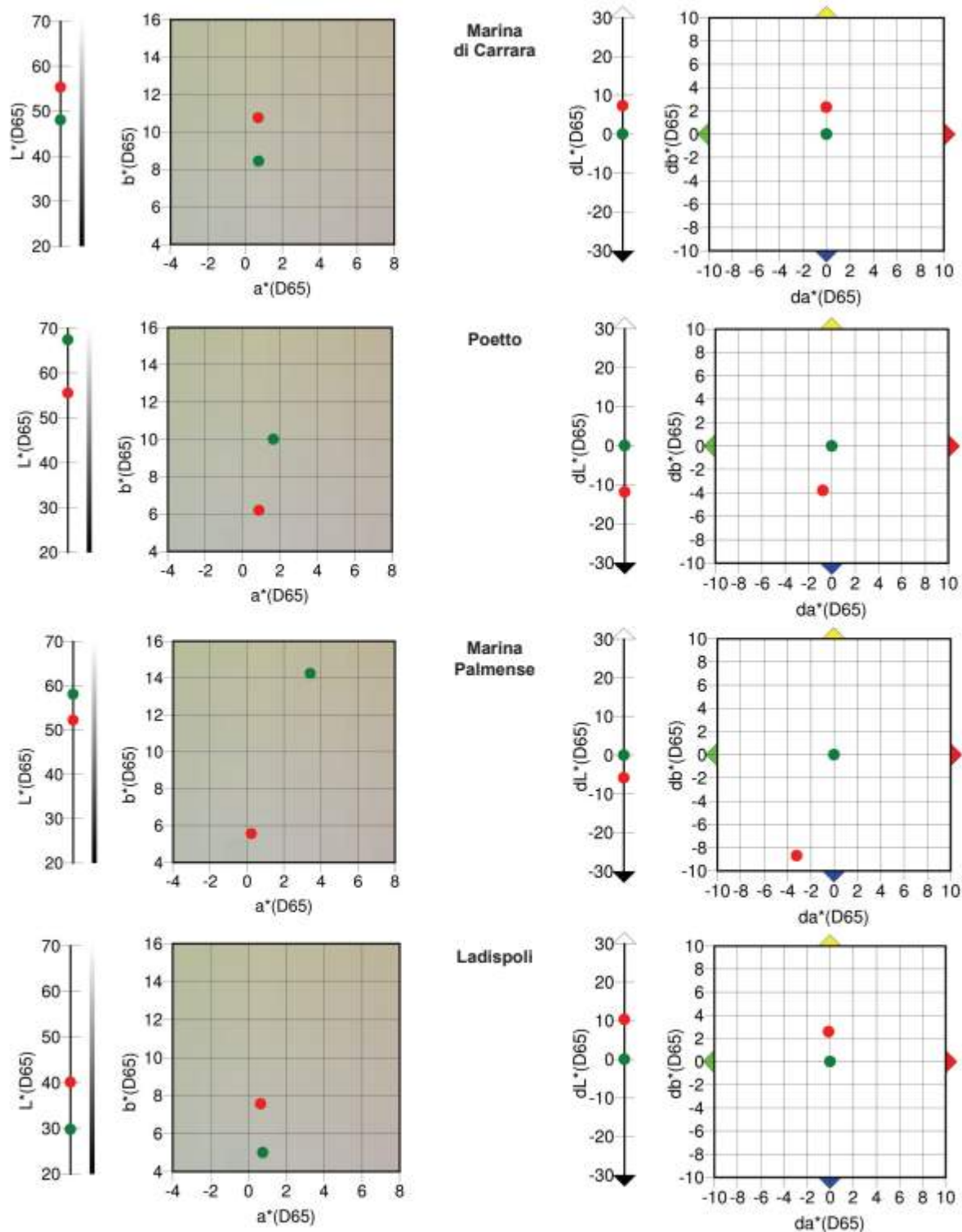


Figura 12a - Chiarezza e Cromaticità dei sedimenti nativi (verde) e di quelli di ripascimento (rosso). Il colore dello sfondo del grafico  $a^*b^*$  è quello reale nello spazio CIEL $^*a^*b^*$ , salvo le modifiche dovute alla stampa. Illuminante D65.

Figura 12b - Differenza in  $L^*$  e in  $a^*b^*$  fra il campione dei sedimenti nativi e quello dei materiali di ripascimento. Illuminante D65.

È probabile che il campione nativo abbia ricevuto piccole quantità del materiale versato e che quello di ripascimento sia stato contaminato da qualche granulo della spiaggia originaria. Si ha ragione quindi di credere che le differenze da noi calcolate siano leggermente inferiori a quelle che separavano i due materiali puri. Nonostante ciò, la differenza cromatica è effettivamente importante ( $\Delta E^*ab = 10.63$ ) ed anche in questo caso attribuibile principalmente alla Chiarezza, anche se questa ha assunto un valore maggiore. In termini di Cromaticità vi è stato solamente un leggero incremento della colorazione gialla ( $\Delta a^* = -0.11$ ;  $\Delta b^* = +2.57$ ).

Il rifiuto di questo intervento, nonostante che il colore chiaro risulti essere più gradito da parte dei frequentatori delle spiagge (Pranzini et al., 2008), trova una sua giustificazione nella volontà degli abitanti locali e dei frequentatori abituali di tutelare il patrimonio naturale della loro costa.

### Conclusioni

La determinazione del colore dei sedimenti di spiaggia comporta non pochi problemi teorici e pratici, ed ancor più complessa è la definizione di criteri sulla base sui quali certificare la compatibilità cromatica fra sedimenti naturali e sedimenti di ripascimento.

Lo spazio colore RGB, sebbene sia di facile utilizzazione, non consente valutazioni oggettive e standardizzate, anche se è idoneo a mostrare qualitativamente le differenze fra i vari campioni, sempre che la misura venga effettuata con la stessa metodologia. Non è comunque possibile quantificare le differenze cromatiche effettive e correlare queste con quelle percepite dall'occhio umano.

Anche il sistema Munsell è di semplice utilizzazione e rispetta la progressività con la quale percepiamo le differenze cromatiche. Ciò che rimane difficile è misurare queste differenze, elemento determinante per esprimerle in modo oggettivo e per definire le specifiche da applicare in progetti di ripascimento dei litorali.

Lo spazio CIEL\*a\*b\* è uno spazio quasi-uniforme definito dalla CIE e, insieme alla scelta di un Illuminante opportuno, è codificato tanto da garantire un'esatta e oggettiva determinazione del colore. Contemporaneamente è possibile misurare la differenza cromatica con un singolo valore numerico ( $\Delta E^*ab$ ), come è possibile rilevare le differenze nelle diverse componenti di Chiarezza ( $\Delta L^*$ ) e di Cromaticità ( $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$ ).

I casi analizzati non sono ancora sufficienti a consentire di stabilire dei valori di differenza cromatica ( $\Delta E^*ab$ ) complessiva o di differenza lungo i singoli assi ( $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$ ) oltre i quali una spiaggia perde il suo colore naturale. Rimarrà comunque sempre aperto il problema se questa perdita sia accettabile nel caso in cui il nuovo colore trovi un maggiore gradimento da parte delle popolazioni locali o dei turisti estivi.

### Ringraziamenti

Le analisi colorimetriche e le relative elaborazioni grafiche sono state effettuate dal Dr. Giovanni Vitale.

### Bibliografia

- ASTM D1535: *Standard Test Method for Specifying Color by the Munsell System*, <http://www.astm.org>.
- Avissar N.G. (2006) - *Modelling potential impacts of beach replenishment on Horseshoe Crab nesting habitat suitability*. Coastal Management, 34: 427-441.
- Bisci C., Cantalamessa G. Baleani C. (2008) - *Considerazioni sull'utilizzo delle sabbie dragate al largo di Civitanova Marche (Adriatico centrale) per il ripascimento delle spiagge*. Atti del Convegno "Costa, Prevenire, Programmare, Pianificare" Studi e ricerche, n. 9. Autorità di Bacino della Basilicata, pp. 333-342.
- Boscarol M. (2007) - *Colorimetria*. [www.boscarol.com](http://www.boscarol.com). 35 pp.
- Bowers S.A. e Hanks R.J. (1965) - *Reflection of radiant energy from soil*. Soil. Sci., 100: 130-138.
- De Angelis G. e Venzi L. (2006) - *Coast protection from erosion: a socio-economical analysis of beach nourishment (the case of Ladispoli beach)*. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on the Management of Coastal Recreational Resources, Gozo, Malta 25-27 Oct. 2006, pp. 1-14.

- De Angelis G. e Venzi L. (2008) - *Un tentativo d'inserimento degli aspetti estetici nello studio di fattibilità delle difese marine dall'erosione*. Agribusiness Paesaggio & Ambiente, 11 (1): 68-77.
- Dickerson D.D., Smith J., Wolters M., Theriot C., Reine K.J. e Dolan J. (2006) - *A review of beach nourishment impacts on marine turtles*. Shore & Beach, 75 (1): 49-55.
- Ebejer J. (2004) - *Creating a sandy beach in St. George's Bay – a new experience for Malta*. 1st Int. Conf. on the Management of Coastal Resources, Malta, Oct. 2004, 161-167 pp.
- Ewing L. (1997) - *Shoreline protection and beach nourishment projects*. Procedural Guidance Document: Monitoring. California Coastal Commission. <http://www.coastal.ca.gov/pdg/pdg-mon.html>.
- Ferri S., Pelliccia F., Pranzini E., Rizzo M. e Vitale G. (2008) - *Prima risposta della spiaggia di Marina di Carrara ad un ripascimento artificiale non protetto*. Studi costieri, 15: 57-72.
- Fleury P e Mathieu J.P. (1966) - *La Luce. Emissione, assorbimento, propagazione. Fisica generale e sperimentale, Vol. 5*, Zanichelli, Bologna, 568 pp.
- Grassman (1853) - *Zur Theorie der Farbenmischung*, Poggendorf Ann. Physik Chem., 89: 69-84.
- Gravens M.B., Emersole B.A., Walton T.L., Wise R.A. (2002) - *Beach Fill Design*. In: Coastal Engineering Manual, Parte 5 Ed.: Donald L. Ward, Cap. 4, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 109 pp.
- Grove S.H. (2007) - *Physical aspects of Southern California beaches and how people perceive them: considerations for beach nourishment planning*. Shore & Beach, 75: 11-21.
- Hampton M.A., Blay C.T. e Murray C.J. (2004) - *Carbonate sediment deposits on the Reef front around Oahu, Hawaii*. Mar. Georesources and Geotechnology, 22: 65-102.
- Hays G.C., Ashworth J.S., Barnsley M.J., Broderick A.C., Emery D.R., Godley B.J., Henwood A., Jones E.L. (2001) - *The importance of sand albedo for the thermal conditions on sea turtle nesting beaches*. Oikos, 93: 87-94.
- Leatherman S.P. (1997) - *Beach rating: A methodological approach*. Journal of Coastal Research, 13: 253-258.
- Leatherman S.P. (1998) - *America's Best Beaches*. Laboratory of Coastal Research & International Hurricane Center, Florida Int. University, Miami, 112 pp.
- Levin N., Ben-Dor E., Singer A. (2005) - *A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments*. Int. Journ. Remote sensing, 26: 5475-5492.
- Malacara Daniel (2002) - *Color vision and colorimetry. Theory and applications*. SPIE Press, Washington, USA, 165 pp.
- Morgan R. (1999) - *Preferences and priorities of recreational beach users in Wales, U.K.* Journal of Coastal Research, 15: 653-667.
- Mulders M.A. (1987) - *Data on interaction of short wave radiation with natural objects*. In Remote sensing in soil science, Dev. in soil science series, 15: 55-91.
- Nordstrom K.F., Jackson N.L. e Pranzini E. (2004) - *Beach sediment alteration by natural processes and human action: Elba Island, Italy*. Ann. Ass. Am. Geogr., 94: 794-806.
- Oleari C. (2003) - *Introduzione alla colorimetria*. Rivista trimestrale Disegno e Design Digitale, 2: (6) 33-47.
- Oleari C. (2008) - *Colorimetria*. In ;isurare il colore, a cura di C. Oleari, Hoepli, Milano, 139-245 pp.
- Pacini M., Pranzini E. e Siritto G. (1999) - *La ricostruzione delle spiagge di Cala Gonone*. Studi costieri, 1: 43-55.
- Paltrinieri D. (2007) - *Nuove fonti di approvvigionamento di sabbia*. Bollettino AIOM, 36: 17-21.
- PMP (2001) - *Prix Méditerranéen du Paysage 2000*. Artes Gráficas, ISBN: 84-8095-273-3, pp. 146.
- Prakash T.N., Black K.P., Mathew J., Kurian N.P., Thomas K.V., Hameed T.S.S., Vinod M.V. e Rajith K. (2007) - *Nearshore and beach sedimentary dynamics in a placer-dominated coast, southwest India*. Journal of Coastal Research, 23: 1391-1398.
- Pranzini E. (2009) - *Protection studies at two recreational beaches: Poetto and Cala Gonone beaches, Sardinia, Italy*. In: Beach Management, Allan Williams and Anton Micallef Eds., Earthscan publishers, in stampa.



- Pranzini E., Simonetti D. e Vitale G. (2008) - *Il colore della sabbia: indagine sul gradimento dei frequentatori di spiagge naturali e di spiagge oggetto di ripascimento artificiale*. Studi Costieri, 15: 109-120.
- Stoner E.R. e Baumgardner M.F. (1980) - *Characteristic variations in reflectance of surface soils*. Soil. Sci. Soc. Am. Journ., 44: 572-574.
- Wiegel R.L. (2006) - *Waimea River mouth to Kekaha beach, Kauai, Hawaii: two distinctive natural sands*. Shore & Beach, 74 (4): 25-32.
- Williams A.T. e Morgan R. (1995) - *Beach awards and Rating systems*. Shore & Beach; 63: (4) 29-33.

**Manoscritto ricevuto il 3/11/2008, accettato il 12/12/2008.**

## **Il colore della sabbia: indagine sul gradimento dei frequentatori di spiagge naturali e di spiagge oggetto di ripascimento artificiale**

**Enzo Pranzini, Daniela Simonetti e Giovanni Vitale**

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze.

### **Riassunto**

Il livello di gradimento del colore della sabbia è stato valutato attraverso interviste durante le quali sono stati mostrati 11 campioni di sabbia di uguale granulometria, ma di diverso colore. Ogni intervistato ha assegnato un voto compreso fra 1 e 10 ad ogni campione presentato in ordine casuale. Le interviste si sono svolte su 5 spiagge naturali (Marina di Massa e Vada, in Toscana, e Passoscuro, Marina di San Nicola e Fregene, in Lazio) e su tre spiagge oggetto di un recente ripascimento artificiale, avvenuto con sedimenti più scuri (Poetto, in Sardegna), più chiari (Ladispoli, in Lazio) ed apparentemente simili (Marina di Carrara, in Toscana) a quelli naturali. Su queste tre spiagge sono stati intervistati frequentatori abituali, sia locali che ospiti estivi.

Il colore dei campioni di sabbia mostrati agli intervistati, quello dei sedimenti presenti sulle spiagge su cui sono state effettuate le interviste e quello dei sedimenti presenti prima dei ripascimenti è stato misurato nello spazio CIEL\*a\*b\* ed anche caratterizzato con le notazioni Munsell.

I dati relativi alle preferenze dei frequentatori di spiagge naturali (40 interviste per ciascuna delle 5 spiagge, con 11 voti espressi da ogni soggetto) indicano una correlazione statisticamente significativa ( $p < 0,001$ ) fra Gradimento e Chiarezza ( $L^*$ ). Dalla retta di regressione individuata si allontanano maggiormente le sabbie con colorazione quasi nera o rossa, riconosciute come esotiche, che hanno un Gradimento superiore a quello che la loro Chiarezza gli garantirebbe. Al contrario, le sabbie grigie hanno un Gradimento leggermente inferiore a quello ipotizzabile sulla base del valore di  $L^*$ .

Sulla spiaggia scura di Ladispoli, alimentata con sedimenti più chiari, il Gradimento verso i colori scuri è mediamente superiore a quello espresso dai frequentatori di spiagge naturali; mentre il Gradimento verso le sabbie chiare è inferiore.

Al contrario, dove la sabbia chiara originaria è stata coperta da sedimenti più scuri (Poetto), la sabbia scura viene notevolmente penalizzata, mentre sale in modo significativo il Gradimento per quella più chiara.

Dove la Chiarezza della sabbia è stata cambiata in misura minore (Marina di Carrara) non si sono avute variazioni nel trend di gradimento.

**Parole chiave:** spiagge, colore della sabbia, ripascimento artificiale.

**Abstract**

*Beach users sand colour preference was evaluated through interviews during which 11 sand samples, different in colour, but equal in grainsize were shown. Each of the 40 persons interviewed in 5 natural (Marina di Massa and Vada, in Tuscany; Passoscuro, Marina di San Nicola and Fregene, in Latium) and 3 renourished beaches (Marina di Carrara, in Tuscany; Ladispoli in Latium and Poetto in Sardinia) gave a mark to each sample from 1 to 10. On renourished beaches, only local people or recurrent summer guest were selected.*

*Sample and beach sand colour was determined in the CIEL\*a\*b\* colour space as well as Munsell notation. Where artificial nourishment was carried out before this study, original sand colour was determined on samples collected in undisturbed sediments or on updrift beaches.*

*Colour acceptance proved to be significantly related to sand Lightness ( $L^*$ ) ( $p < 0,01$ ). Outliers very dark or red sands were perceived as exotic and therefore evaluated more than their Lightness predicted. Conversely, grey sands had a lower appeal in respect to their Lightness and lay below the regression line plotted out.*

*On the black Ladispoli beach, filled with lighter sediments, dark sands are more appreciated than in the control natural beach of the same colour, and light ones scored a lower value. Conversely, at Poetto, where the original white sand was covered with grey sediments, dark samples were rejected, whereas light sand had the highest evaluation.*

*Where sand Lightness was not so strongly modified, the beach users preference scale was almost the same of that obtained on control natural beach.*

**Keywords:** *beaches, sand colour, beach nourishment.*

**Introduzione**

La difesa dei litorali, attuata per decenni con la costruzione di scogliere di vario tipo, ha modificato pesantemente il paesaggio costiero italiano, trasformando spesso litorali sabbiosi in coste rocciose, o comunque inserendo elementi estranei che hanno modificato la morfologia delle spiagge, sia nel loro profilo trasversale che nell'andamento longitudinale della linea di riva (GN-RAC, 2006).

La recente adozione delle tecniche di difesa morbida, basate essenzialmente sul ripascimento artificiale, ha ridotto notevolmente l'impatto degli interventi sulle caratteristiche paesaggistiche delle nostre coste e, pertanto, è stata vista con favore dalle amministrazioni pubbliche, dagli operatori turistici e dalle associazioni ambientaliste; inoltre, tali tecniche rientrano nelle buone pratiche suggerite dai risultati di numerosi progetti europei (BEACHMED, 2004; EUROSION, 2007).

I problemi progettuali nel ripascimento dei litorali riguardano la definizione delle caratteristiche granulometriche dei materiali da impiegare, che condizionano la stabilità dell'intervento e la fruibilità dell'arenile, e gli aspetti relativi alla reperibilità dei sedimenti, con risvolti logistici ed economici sul progetto, con una preferenza che si è affermata negli ultimi anni per i sedimenti provenienti da cave marine (Pranzini, 2004).

Nelle specifiche tecniche dei materiali di ripascimento raramente viene indicato il colore, anche se talvolta questo parametro entra indirettamente con la definizione delle caratteristiche petrografiche (sabbie silicee, carbonatiche, ecc.), ma ciò è generalmente fatto allo scopo di garantire determinate qualità meccaniche dei materiali.

L'attenzione al colore della sabbia è sempre stata scarsa, come dimostra fra l'altro il fatto che il Coastal Engineering Manual (Gravens et al., 2002) afferma che la compatibilità fra sedimenti nativi e di ripascimento è prioritariamente basata sulla granulometria e in misura minore sul colore. Anche se ciò, dal punto di vista ingegneristico, è condivisibile, è sorprendente che nei progetti di ripascimento non si ponga la minima attenzione ai problemi indotti dall'immissione di sedimenti di colore diverso da quello dei sedimenti naturali. Ciò potrebbe determinare trasformazioni paesaggistiche importanti proprio da parte di quelle tecniche morbide che sembravano

scongiurare ulteriori modificazioni ambientali. Una indagine preliminare fatta dagli Autori a livello europeo, chiedendo informazioni a colleghi che operano nel settore, indica che in quasi nessun paese esistono norme specifiche che regolino questo aspetto.

Senza volerci addentrare nelle problematiche relative all'estetica del paesaggio e alla eventuale inopportunità di modificare le componenti fisiche degli ambienti naturali, rimane aperta la discussione sui cambiamenti possibili in contesti già pesantemente modificati dall'uomo, che hanno già perso gran parte delle loro caratteristiche originarie (Nordstrom, 2004). In questi casi l'impiego di sabbia di colore diverso da quello della spiaggia naturale potrebbe essere valutato al pari della realizzazione di una passeggiata a mare o della costruzione di un nuovo edificio, elementi che, se progettati correttamente, possono contribuire ad incrementare il valore paesaggistico dell'ambiente urbanizzato.

In quest'ottica assume una certa importanza la comprensione del gradimento del colore della sabbia da parte dei frequentatori della spiaggia. Per ottenere tale informazione e per poterla inserire nei parametri di ottimizzazione dei progetti di ripascimento è opportuno che la determinazione del colore avvenga con tecniche ripetibili e certificate, cosa che al momento manca in letteratura.

Indagini sul gradimento del colore sono state condotte da Grove (2007) nella California meridionale, ed è emerso che le sabbie chiare sono preferite a quelle grigio scure. Nei *beach rating systems* (Williams e Morgan, 1995; Leatherman, 1997; Morgan, 1999) al colore bianco della sabbia è attribuito il punteggio massimo, uguagliato solo dal colore rosa, e valori decrescenti sono assegnati a sabbie più scure. Non sempre viene spiegato su quali basi sia stata stabilita questa gerarchia e, comunque, il colore e la luminosità della sabbia non sono definiti in modo oggettivo.

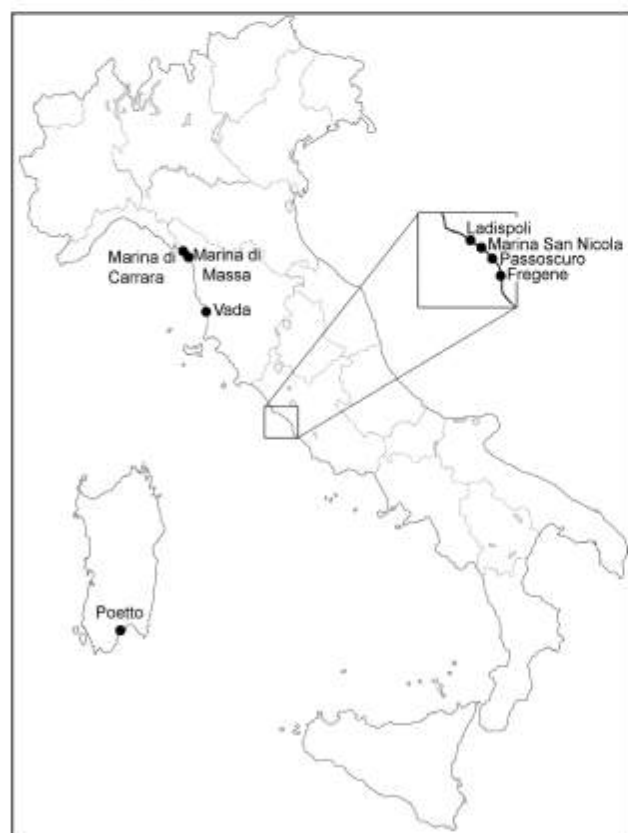


Figura 1 - Posizione delle spiagge sulle quali sono state realizzate le interviste.

Nel presente lavoro si intende valutare il Gradimento da parte dei frequentatori del litorale toscano e laziale (Fig. 1) di sabbie per le quali il colore è stato determinato in modo strumentale e secondo criteri definiti dalla *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE).

Le spiagge sulle quali sono state effettuate le interviste hanno luminosità diversa, da quelle molto chiare di Vada a quelle quasi nere di Marina di S. Nicola, passando per le spiagge di luminosità intermedia di Marina di Massa, Passoscuro e Fregene.

Parallelamente, l'indagine è stata condotta su spiagge sulle quali sono stati effettuati di recente dei ripascimenti artificiali: con sedimenti apparentemente simili (Marina di Carrara; Ferri et al., 2008), più scuri (Poetto; Pranzini, in stampa) e più chiari (Ladispoli; De Angelis e Venzi, 2008) rispetto a quelli naturali. Tutto ciò ha consentito, da un lato di valutare il Gradimento dei vari colori delle sabbie mostrate e dall'altro di verificare se questa valutazione "normale" viene mantenuta anche dove il colore della spiaggia è stato modificato artificialmente.



## Materiali e metodi

Per il test di gradimento del colore sono state selezionate 11 sabbie cromaticamente diverse (Fig. 2), che sono state setacciate in modo da presentare agli intervistati sedimenti di granulometria uguale (sabbia medio-fine che è passata al setaccio 1.5 phi e trattenuta dal setaccio 2.5 phi; si tratta quindi di 11 Campioni composti da granelli compresi fra 0.350 e 0.177 mm).

Il colore delle sabbie campione, di quelle della spiaggia sulla quale è stata effettuata l'intervista e delle sabbie originarie, nei casi di ripascimento, è stato determinato nello spazio CIEL\*a\*b\*, con illuminante D65<sup>1</sup> (Tab. 1). Le misure sono state effettuate per mezzo di un colorimetro Konica Minolta CR-410 con illuminazione diffusa e campo di lettura di Ø 50 mm. Per riferimento alla scarsa letteratura esistente in materia, la determinazione del colore è stata effettuata anche nel sistema Munsell, non utilizzando però le Tavole di comparazione, ma sempre lo stesso colorimetro, in questo caso con illuminante C (come previsto dalle norme CIE).

In Tabella 2 vengono riportate le coordinate CIEL\*a\*b\* e le notazioni Munsell degli 11 campioni mostrati ai soggetti intervistati, mentre nelle Figure 3a e 3b è indicata la posizione dei campioni nello spazio CIEL\*a\*b\*.

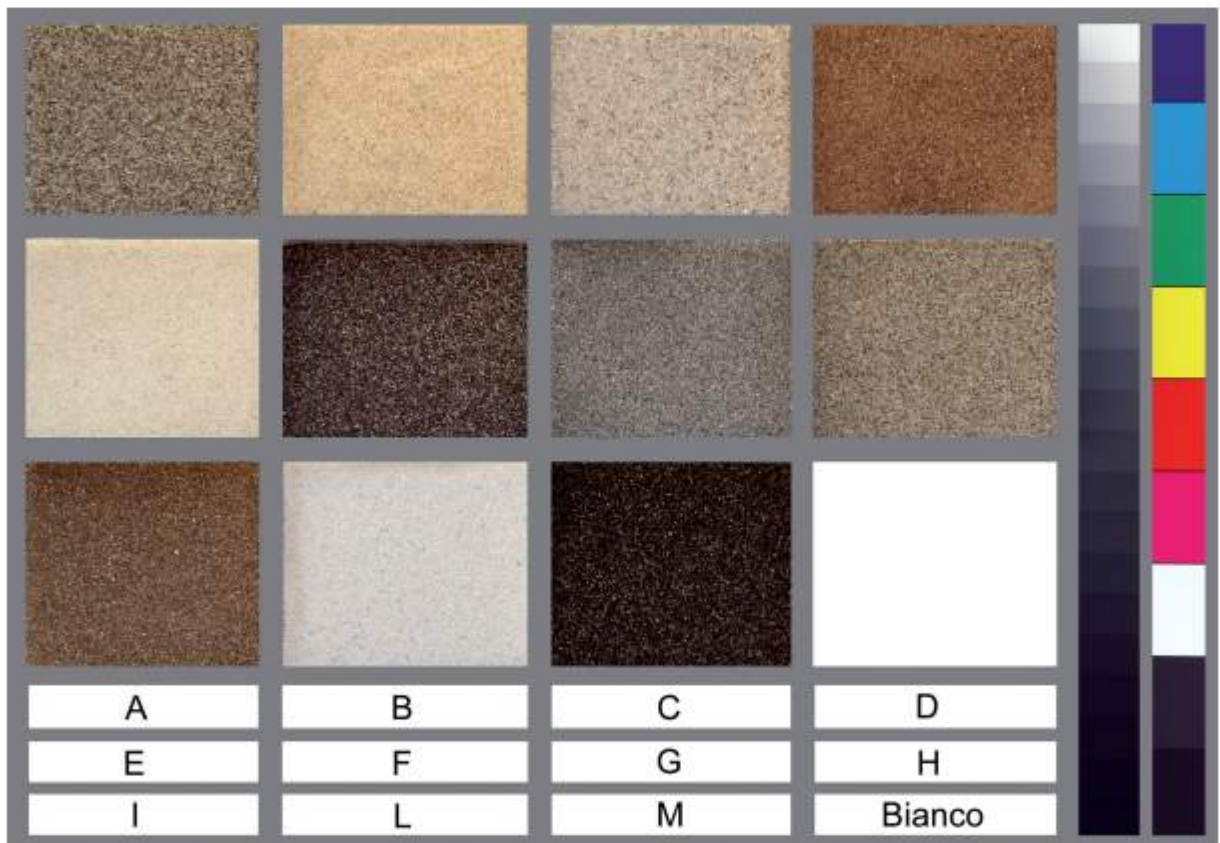


Figura 2 - I campioni di sabbia utilizzati per le interviste e il pannello bianco di calibrazione. A fianco *Kodak gray scale* e *Kodak color scale* per la valutazione della differenza fra i colori originali e quelli stampati. La griglia grigia è stata sovrapposta ad un'unica foto e quindi le condizioni di illuminazione e la deformazione cromatica sono le stesse per tutti i campioni e per le scale di riferimento.

<sup>1</sup> Il CIEL\*a\*b\* è uno spazio colore percettivamente quasi-uniforme (le differenze delle coordinate corrispondono quasi alle differenze percepite dall'occhio umano) definito dalla *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) nel 1976. La differenza fra due colori ( $\Delta E^*$ ) è data dalla distanza euclidea nello spazio L\*a\*b\*. Per informazioni più complete sulla Colorimetria si consiglia il testo di Oleari (2008), mentre sul problema della determinazione del colore dei sedimenti di spiaggia si rimanda al lavoro di Pranzini pubblicato su questo numero di *Studi costieri*.

Come si può notare sia dalla Tabella 1 sia dalla Figura 3, le sabbie si differenziano molto di più per la Chiarezza che non per la Cromaticità. Ciò è piuttosto evidente data l'elevata frequenza di litotipi grigi e gialli, nelle varie tonalità e luminosità, la scarsità di quelli verdi e l'assoluta mancanza di litotipi blu. Di fatto, anche sabbie apparentemente molto diverse nel loro colore, come appare dalla Figura 2, ricadono in uno spazio assai ristretto qualunque sia il sistema colorimetrico utilizzato. I campioni di sabbia sono stati prima mostrati agli intervistati tutti insieme per alcuni secondi, in modo che ne potessero percepire la variabilità, e successivamente sono stati presentati singolarmente in sequenza casuale, chiedendo loro di esprimere il Gradimento (G) del colore con una scala compresa fra 1 (poco gradito) a 10 (molto gradito). Veniva inoltre spiegato che non era obbligatorio coprire tutto il *range* e che era possibile assegnare lo stesso voto a più campioni, ciò per far sì che gli intervistati fornissero misure indipendenti di G e non tendessero a costituire dei ranghi.

Tabella 1 - Chiarezza ( $L^*$ ), Cromaticità ( $a^*, b^*$ ) e notazione Munsell degli 11 campioni di sabbia mostrati nel corso delle interviste.

Campione sabbia	$L^*(D65)$	$a^*(D65)$	$b^*(D65)$	Munsell
A	49,37	0,75	9,38	3,1 Y 4,8 /1,3
B	69,97	4,02	18,61	9,5 YR 6,8 /2,7
C	66,08	2,03	9,32	0,1 Y 6,4 /1,3
D	48,78	7,89	15,52	6,9 YR 4,7 /2,6
E	75,31	2,45	13,36	1,2 Y 7,4 /2,0
F	39,86	1,48	5,79	2,4 Y 3,9 /0,8
G	52,96	0,24	5,58	4,9 Y 5,1 /0,8
H	56,69	1,56	11,26	3,1 Y 5,5 /1,6
I	46,00	4,07	13,01	0,5 Y 4,4 /1,9
L	77,44	2,00	6,02	8,8 YR 7,6 /1,0
M	30,72	0,40	5,75	4,9 Y 3,0 /0,9

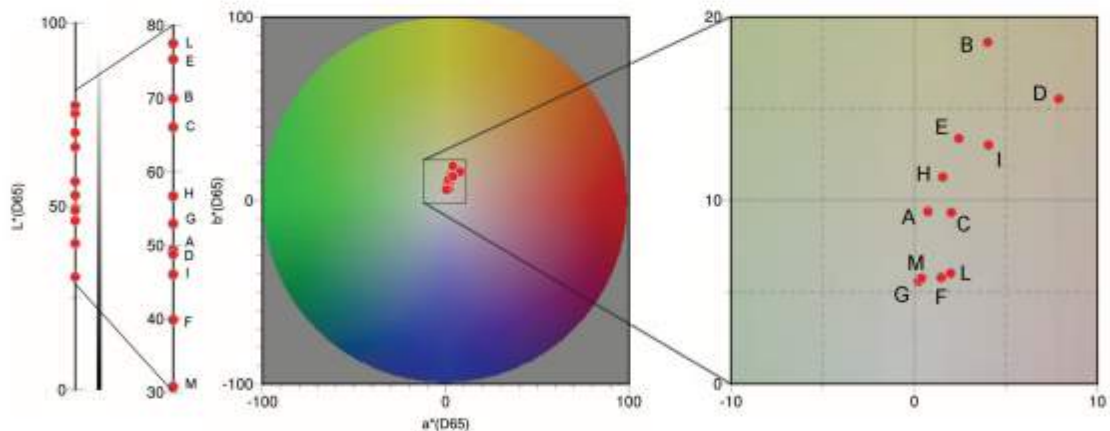


Figura 3 – Posizione dei campioni analizzati nello spazio CIEL\*a\*b\*(D65). A sinistra sull'asse della Chiarezza ( $L^*$ ); al centro nel piano delle Cromaticità ( $a^*b^*$ ); a destra un ingrandimento della parte occupata dai campioni.

Su ciascuna spiaggia sono state effettuate 40 interviste alla fine della stagione estiva, durante giornate assolate e nelle ore centrali della giornata, per operare con un illuminante D65. Gli intervistati sono stati scelti in modo da rappresentare uniformemente tutte le classi di età ed

entrambi i sessi (Tab. 2). Nonostante ciò, il numero di giovani (20 ÷ 30 anni) è risultato leggermente superiore, cosa che, comunque, rispetta la loro maggiore frequenza sulle spiagge considerate.

La stessa procedura è stata seguita sia sulle spiagge naturali che su quelle oggetto di interventi di ripascimento, ma scegliendo per quest'ultime frequentatori abituali (residenti in zona o ospiti estivi ricorrenti); infine, a questi intervistati è stato anche chiesto se avessero notato differenze del colore della sabbia rispetto a quello che ricordavano e, in caso affermativo, se erano in grado di descrivere quello originario.

**Tabella 2 - Numero degli intervistati per sesso e classe di età.**

Età	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	>70
Femmine	35	24	28	23	22	15
Maschi	33	22	20	28	26	15
Totale	68	46	48	51	48	30

### Valutazione del Gradimento da parte di frequentatori di spiagge naturali

La prima analisi effettuata sui dati ha riguardato il calcolo del voto medio, e della sua deviazione standard, sulla base dei voti assegnati agli 11 campioni dai 40 intervistati sulle 5 spiagge naturali (per un totale di 440 interviste). In Tabella 3 e in Figura 4 sono riportati questi valori.

**Tabella 3 - Gradimento medio e deviazione standard calcolati sulla base delle 440 interviste realizzate sulle spiagge naturali.**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M
Media	5,2	7,3	7,1	5,5	8,0	4,9	5,3	6,0	5,4	8,3	5,1
Dev.st.	1,7	2,2	1,7	2,3	2,2	2,3	1,9	1,8	2,3	2,2	2,9

Il massimo gradimento è stato ottenuto dalle sabbie più chiare presentate (8.3 il campione L e 8.0 il campione E), mentre i voti più bassi sono stati assegnati alle sabbie più scure (4.9 al campione F e 5.1 al campione M). È interessante notare come il campione più scuro mostrato (M), abbia registrato il valore massimo di deviazione standard (2.9), poiché alcuni intervistati gli hanno assegnato un voto elevato. Campioni grigiastri hanno avuto una valutazione medio-bassa condivisa da tutti gli intervistati (dev. st. bassa) mentre quelli rossi, pur rifiutati dalla gran parte degli intervistati, hanno trovato alcuni estimatori, come mostra il valore elevato della deviazione standard (2.3).

Confrontando i voti relativi al gradimento delle varie sabbie con la loro Chiarezza (Figura 5) si rileva una correlazione significativa ( $p < 0.001$ ).

Le motivazioni del voto si comprendono meglio analizzando i campioni la cui media si discosta maggiormente della retta di correlazione (Fig. 6): la sabbia M (definita dagli intervistati come "nera") ha un gradimento maggiore di quello che la sua Chiarezza gli garantirebbe. Ciò è da attribuirsi agli aspetti esotici e ricollegabili alla visione, reale o immaginaria, delle spiagge delle isole vulcaniche sia del Mediterraneo che del Pacifico, frequentemente citate dagli intervistati. Analogo discorso vale per le sabbie scure ma rossicce D e I ( $a^* = +7.89$  e  $+4.07$  rispettivamente), generalmente poco apprezzate, ma che per alcuni ricordano gli ambienti tropicali.

Una situazione inversa si registra per i campioni A e G, costituiti da sabbie "banalmente grigie" (a detta di alcuni intervistati), seppure simili a quelle di molti tratti del litorale toscano e, subordinatamente, laziale; queste sono quindi meno apprezzate in realtà di quanto il valore di  $L^*$  porterebbe a pensare.

Risultati analoghi emergono dall'analisi dei dati disaggregati: il Gradimento espresso nei confronti dei vari campioni è significativamente correlato con la Chiarezza per ogni popolazione intervistata sulle 5 spiagge naturali (Tab. 4; Fig. 5).



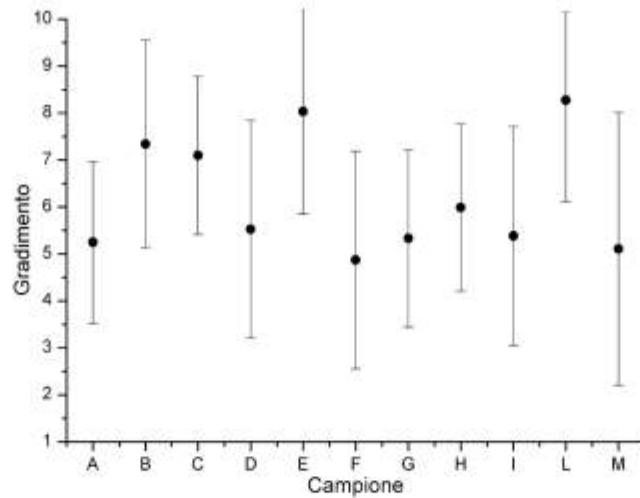


Figura 4 - Gradimento medio espresso nei confronti degli 11 campioni di sabbia dai 440 intervistati sulle spiagge naturali (le aste indicano la deviazione standard).

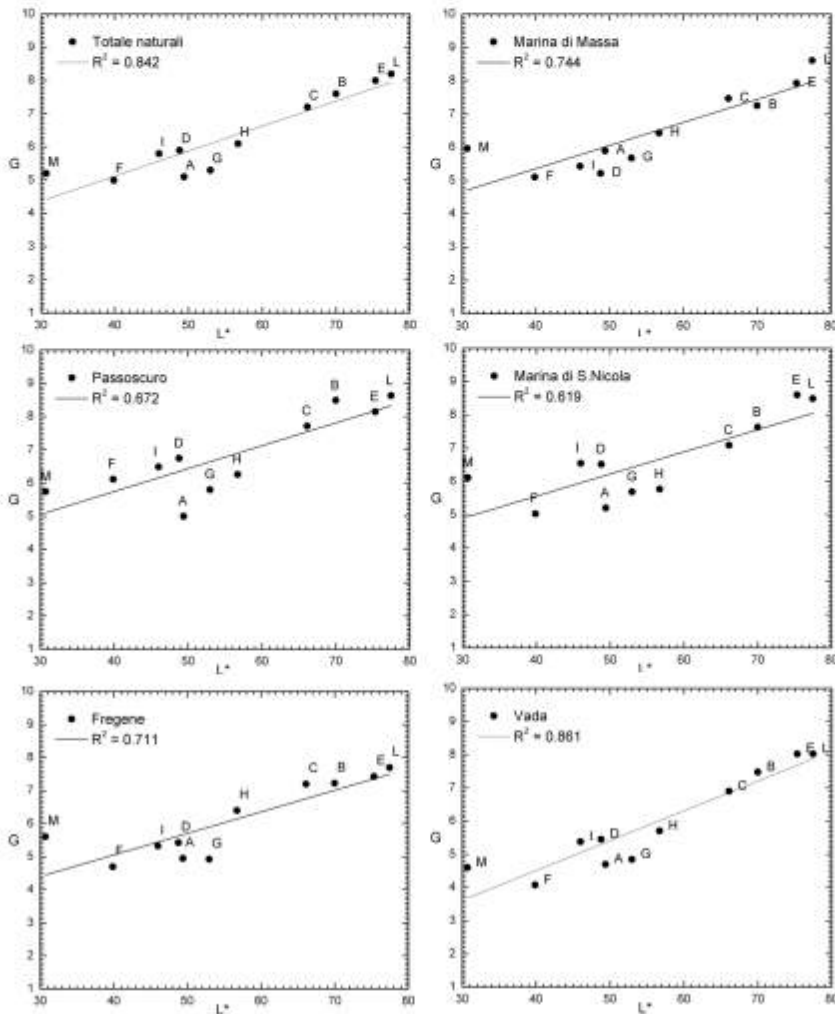


Figura 5 - Confronto fra Gradimento (G) medio e Chiarezza (L\*) per gli 11 campioni di sabbia mostrati nelle interviste effettuate su tutte le spiagge naturali e, separatamente, su ciascuna di esse.



**Tabella 4 - Gradimento medio calcolato sulla base delle 40 interviste realizzate su ciascuna delle 5 spiagge naturali e delle 3 oggetto di un recente ripascimento artificiale.**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M
Vada	4.7	7.5	6.9	5.5	8.0	4.1	4.9	5.7	5.4	8.0	4.6
Passoscuro	5.0	8.5	7.7	6.7	8.1	6.1	5.8	6.3	6.5	8.6	5.7
Marina San Nicola	5.2	7.6	7.1	6.5	8.6	5.0	5.7	5.8	6.5	8.5	6.1
Fregene	5.0	7.2	7.2	5.4	7.4	4.7	4.9	6.4	5.3	7.7	5.6
Marina di Massa	5.9	7.3	7.5	5.2	7.9	5.1	5.7	6.4	5.4	8.6	6.0
Marina di Carrara	6.3	6.2	7.4	4.5	7.1	4.1	5.8	7.1	4.3	7.1	3.5
Ladispoli	5.8	7.1	7.1	5.9	8.2	6.5	6.4	6.3	5.7	8.3	6.9
Poetto	4.7	7.1	6.3	4.6	8.7	2.9	3.7	4.8	3.8	9.1	3.3

**Analisi del Gradimento da parte di frequentatori di spiagge soggette a ripascimento artificiale**

Questa parte dello studio intende valutare se la variazione del colore della spiaggia indotta da un ripascimento artificiale influenzi o meno il livello di Gradimento per le varie sabbie da parte dei frequentatori abituali.

Come si può osservare dai dati riportati nella Tabella 5 e nella Figura 6, le tre spiagge sulle quali sono state effettuate le interviste hanno subito variazioni cromatiche significative a seguito di interventi di ripascimento. Il cambiamento maggiore, in tutti e tre i casi studiati, è stato quello relativi alla Chiarezza ( $L^*$ ), parametro che abbiamo visto essere correlato positivamente con il Gradimento.

A Marina di Carrara una spiaggia con  $L^* = 48.0$  è stata coperta con sabbia avente  $L^* = 55.3$ , con un incremento di Chiarezza ( $\Delta L^*$ ) pari a 7,3.

La spiaggia scura di Ladispoli ( $L^* 29,7$ ) è stata oggetto di un ripascimento con sedimenti aventi  $L^* = 40.1$ , che hanno determinato un incremento di Chiarezza ( $\Delta L^* = 10.3$ ), maggiore di quello registrato nel caso precedente.

Al Poetto è avvenuto un processo inverso, passando da una spiaggia originariamente chiara ( $L^* = 67.4$ ) ad una più scura ( $L^* = 55.5$ ) con una rilevante riduzione di Chiarezza ( $\Delta L^* = 11.9$ ).

**Tabella 5 - Notazioni Munsell e coordinate CIEL\*a\*b\* (D65) dei campioni di sabbie naturali e di ripascimento. Le ultime quattro colonne indicano le differenze cromatiche nei tre assi e assolute.**

		Munsell	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E^*_{ab}$
Marina di Carrara	Nativo	3.0 Y 4.6 /1.2	48.01	0.72	8.44	7.30	-0.02	2.31	7.66
	Rip.	4.3 Y 5.4 /1.5	55.31	0.70	10.75				
Ladispoli	Nativo	4.3 Y 3.0 /0.7	29.75	0.76	5.00	10.31	-0.11	2.57	10.63
	Rip.	5.0 Y 3.9 /1.0	40.06	0.65	7.56				
Poetto	Nativo	3.3 Y 5.4 /0.9	67.38	1.65	10.00	-11.89	-0.76	-3.81	12.51
	Rip.	0.8 Y 6.6 /1.4	55.49	0.88	6.19				

I risultati delle analisi delle risposte degli intervistati in queste tre località seguono, in prima approssimazione, quelli generali che indicano una preferenza per le sabbie chiare maggiore rispetto a quella riservata ai sedimenti scuri (Fig. 7). Sono però presenti differenze significative sulle valutazioni delle singole sabbie, che portano a posizioni diverse ed a pendenze diverse delle rette di correlazione che spiegano la dipendenza del Gradimento dalla Chiarezza.

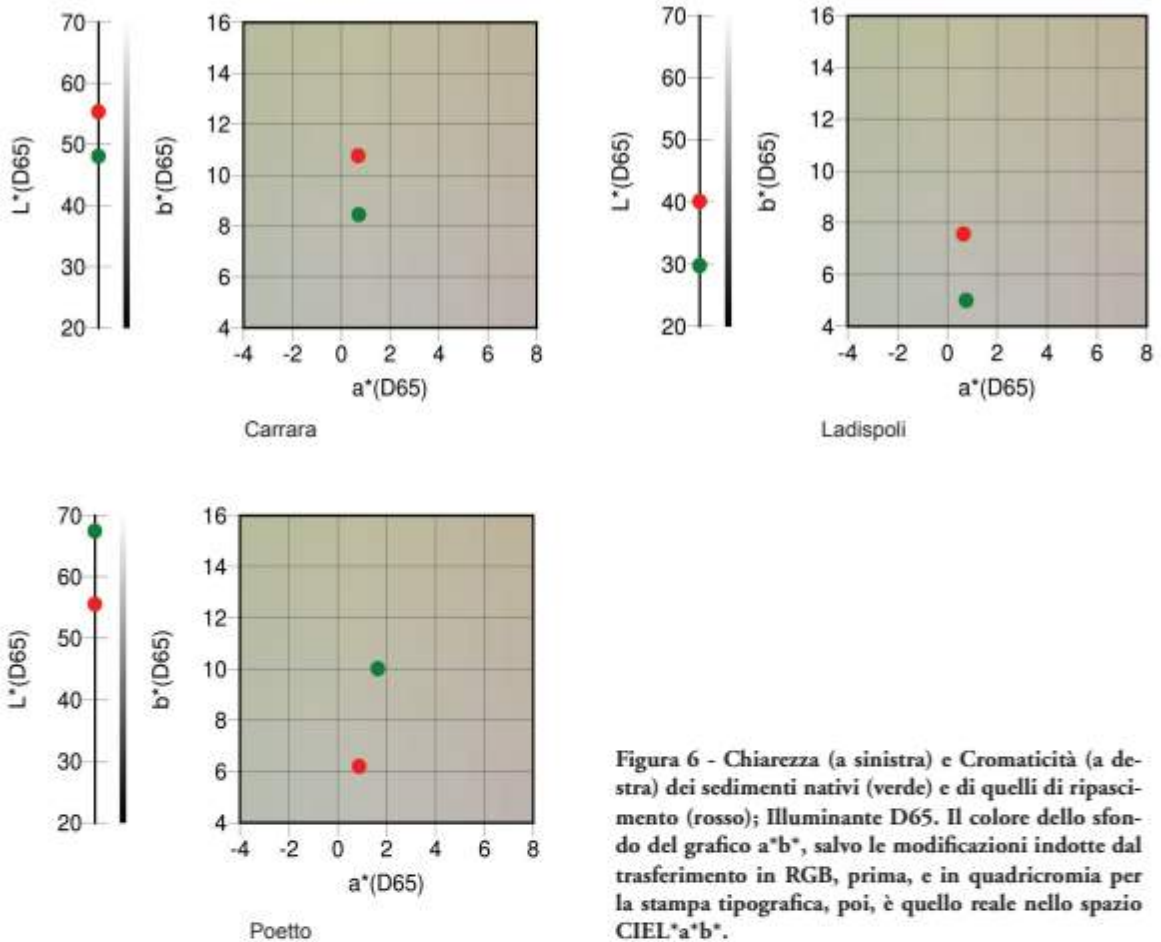


Figura 6 - Chiarezza (a sinistra) e Cromaticità (a destra) dei sedimenti nativi (verde) e di quelli di ripascimento (rosso); Illuminante D65. Il colore dello sfondo del grafico  $a^*b^*$ , salvo le modificazioni indotte dal trasferimento in RGB, prima, e in quadricromia per la stampa tipografica, poi, è quello reale nello spazio CIEL $^*a^*b^*$ .

La traslazione delle rette di regressione è ben apprezzabile nel valore di  $G$  che si interpola ad  $L^* = 50$ : 5.5 al Poetto, 6.1 a Marina di Carrara e 6.6 a Ladispoli. (Fig. 7). Se a ciò si aggiunge la diversa pendenza delle rette, si evidenzia che i frequentatori del Poetto sono mediamente più esigenti nei confronti della Chiarezza e discriminano molto di più fra sabbie chiare e sabbie scure. A Ladispoli la richiesta di Chiarezza è meno forte e si evidenziano minori differenze di Gradimento fra sabbie di  $L^*$  diversa.

Per valutare se questo atteggiamento è stato influenzato dal ripascimento, si è posta l'ipotesi che le preferenze originarie (pre-ripascimento) siano state analoghe a quelle espresse da frequentatori di spiagge di Chiarezza simile. Le risposte degli intervistati sulla spiaggia di Marina di Carrara sono quindi state confrontate con quelle dei frequentatori della spiaggia di Marina di Massa (Chiarezza intermedia); quelle raccolte a Ladispoli con quelle di Marina di San Nicola (spiagge scure) e, infine, quelle del Poetto con quelle di Vada (entrambe molto chiare) (Tab. 6).

Tabella 6 - Valori di Chiarezza delle spiagge alimentate artificialmente e di quelle usate come controllo.

Sperimentale	$L^*$	Controllo	$L^*$	$\Delta L^*$
Marina di Carrara	48.01	Marina di Massa	49.18	-1.17
Ladispoli	29.75	Marina di S. Nicola	32.66	-2.91
Poetto	67.38	Vada	65.55	1.83

Le rette di regressione (Fig. 8) rappresentative delle popolazioni Marina di Carrara e Marina di Massa tendono ad essere parallele, tanto da poter affermare che l'immissione di sedimenti leggermente più chiari non sembra avere condizionato la valutazione delle varie sabbie espressa dai frequentatori della spiaggia di Marina di Carrara, che comunque dimostrano di essere meno esigenti di quelli che si recano a Marina di Massa (la retta di regressione rappresentativa del primo sito si posiziona leggermente sotto quella del secondo).

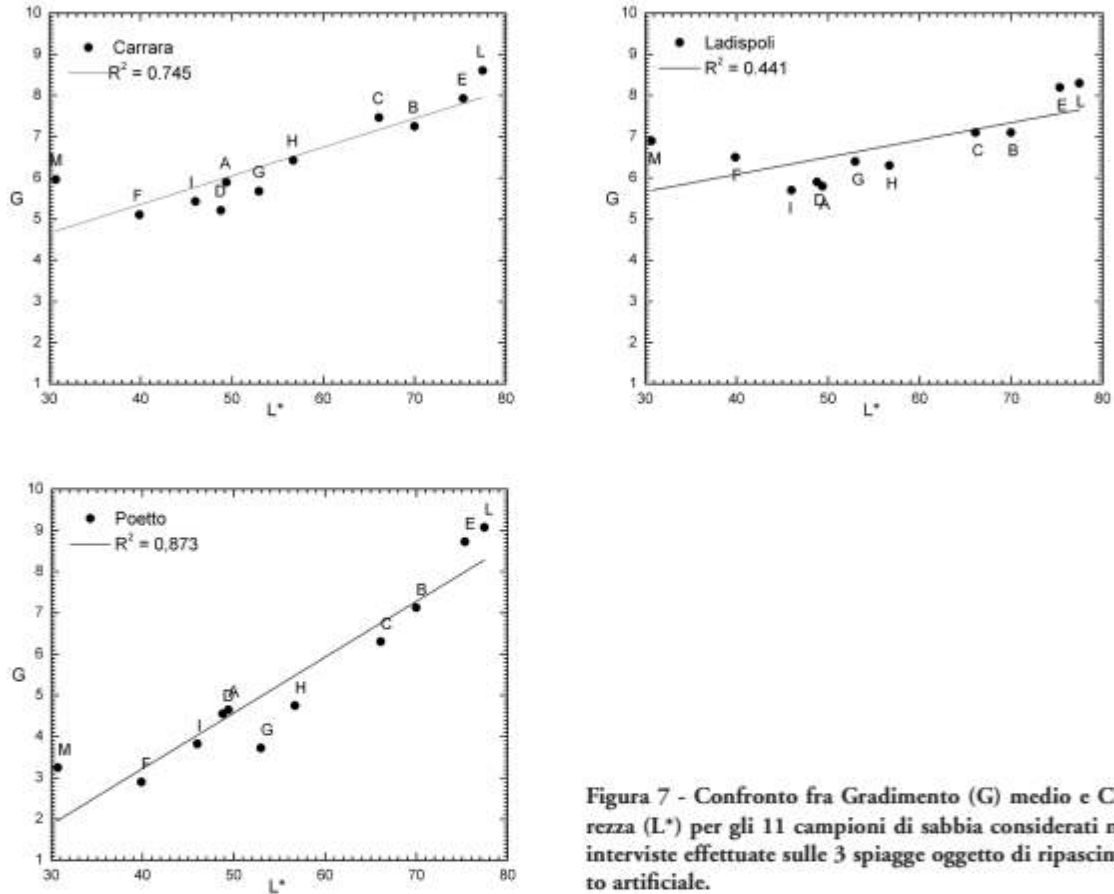


Figura 7 - Confronto fra Gradimento (G) medio e Chiarezza (L\*) per gli 11 campioni di sabbia considerati nelle interviste effettuate sulle 3 spiagge oggetto di ripascimento artificiale.

Il confronto fra le risposte ottenute a Ladispoli e a Marina di San Nicola (Fig. 8) mostra un diverso atteggiamento nei confronti del colore della sabbia: il Gradimento per i sedimenti scuri è maggiore a Ladispoli che non a Marina di San Nicola, mentre quelli chiari ottengono votazioni più basse. Sebbene le due rette siano vicine, i loro coefficienti angolari sono assai diversi. L'immissione di sabbia chiara su un arenile caratterizzato da sedimenti scuri ha fatto abbassare il livello di Gradimento dei campioni dotati di maggiore Chiarezza. Un dato indiretto, a conferma di questo risultato, è fornito da De Angelis e Venzi (2006), che rilevano come l'impiego di sedimenti più chiari per il ripascimento non sia stato apprezzato dal 21% dei tradizionali frequentatori di questa spiaggia.

Un processo opposto è avvenuto al Poetto (Fig. 9), dove il Gradimento per le sabbie scure è decisamente inferiore a quello registrato a Vada, mentre le sabbie molto chiare sono apprezzate in modo maggiore. La pendenza della retta rappresentativa delle preferenze dei frequentatori del Poetto è la massima trovata, a riprova del rifiuto dato nei confronti del ripascimento artificiale che ha trasformato la loro spiaggia bianca in una spiaggia grigiastra.

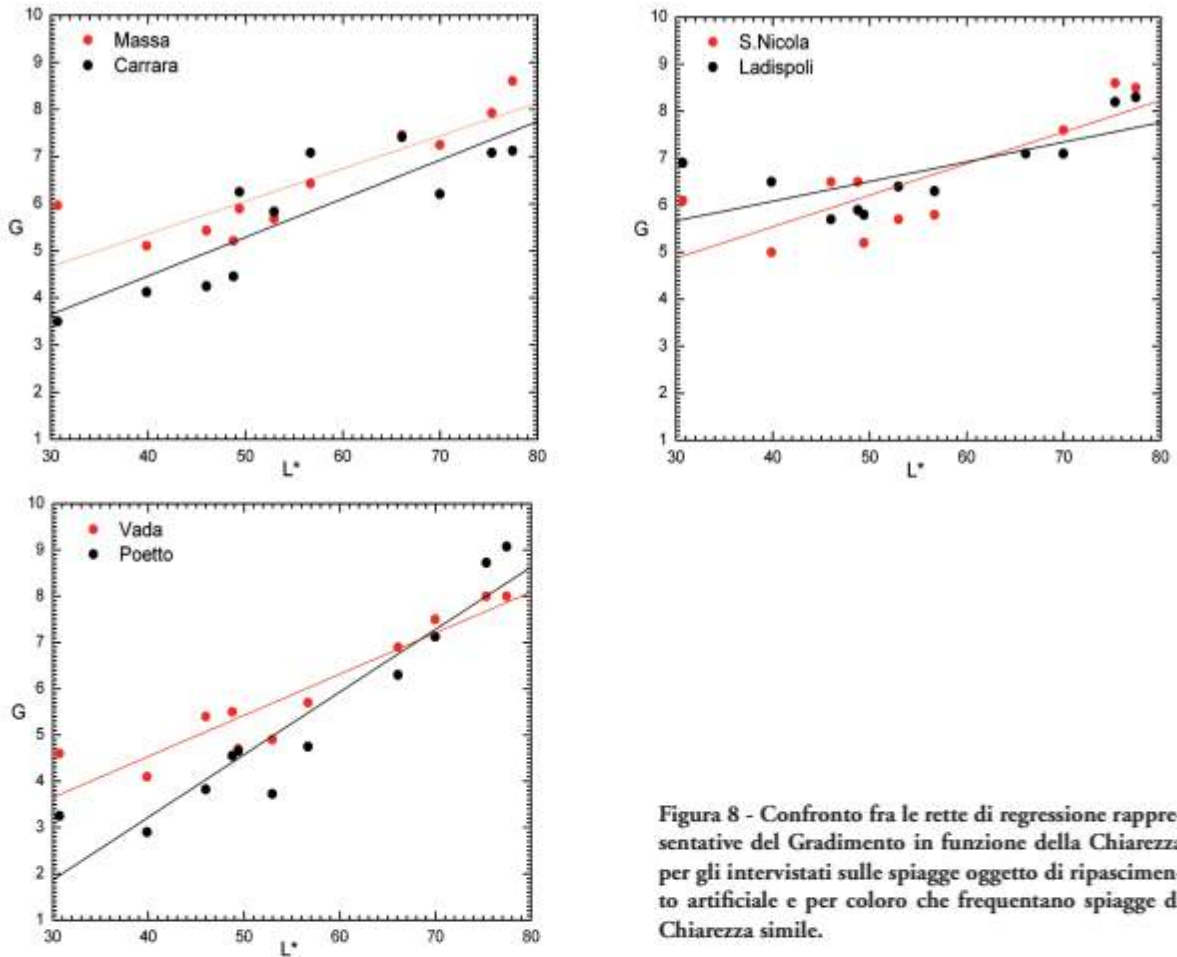


Figura 8 - Confronto fra le rette di regressione rappresentative del Gradimento in funzione della Chiarità per gli intervistati sulle spiagge oggetto di ripascimento artificiale e per coloro che frequentano spiagge di Chiarità simile.

## Conclusioni

Le interviste effettuate su spiagge naturali di diverso colore e su spiagge oggetto di recenti ripascimenti artificiali, che hanno alterato il colore originario dei sedimenti, forniscono importanti informazioni, sia sulla preferenza nei confronti del colore della sabbia da parte dei bagnanti, sia sulle modifiche indotte dall'alterazione sul grado di Gradimento dei vari colori.

Nelle spiagge naturali si è dimostrata l'esistenza di una correlazione significativa ( $p < 0.001$ ) fra Chiarità ( $L^*$ ) e Gradimento. Dal trend generale escono spiagge percepite come esotiche, quelle particolarmente nere o quelle rosse, la cui votazione media risulta leggermente superiore rispetto a quella attesa sulla base della loro Chiarità.

Laddove il ripascimento artificiale non ha modificato molto il colore della spiaggia, ma anzi l'ha reso un poco più chiaro (Marina di Carrara), gli utenti, molti dei quali non hanno notato la variazione, non hanno mostrato deviazioni nel trend di Gradimento per i vari colori rispetto a quello espresso da utenti di spiagge colorimetricamente simili.

Al contrario, l'immissione artificiale di sedimenti significativamente più chiari in spiagge scure (Ladispoli), pur non inficiando l'affermazione "chiaro è bello", ha determinato un calo di Gradimento per i sedimenti chiari ed un aumento di quello per le sabbie scure, conferendo una minore pendenza alla retta di regressione, che in questo caso assume il valore più basso registrato.

Dove invece i sedimenti chiari naturali sono stati ricoperti con sabbie scure (Poetto) si è registrato un comportamento inverso, con un marcato rifiuto dei campioni scuri ed una entusiastica valutazione delle sabbie bianche.



Tutto ciò dimostra che il mantenimento delle caratteristiche del paesaggio costiero è un sentimento ampiamente diffuso che influenza anche le preferenze estetiche dei frequentatori abituali delle nostre spiagge. Questo aspetto, fino ad oggi sottovalutato, dovrà essere tenuto in debito conto nei progetti di ripascimento artificiale e nella ricerca del consenso da parte dei vari *stakeholders*.

### Ringraziamenti

Si ringrazia il Dr. Andrea Serreli per la collaborazione fornita nella realizzazione delle interviste al Poetto.

### Bibliografia

- BEACHMED (2004) - *Il Progetto BEACHMED: Recupero ambientale e mantenimento dei litorali in erosione con l'utilizzo di depositi sabbiosi marini*. 3° Quaderno tecnico. Regone Lazio, 279 pp.
- De Angelis G. e Venzi L. (2008) - *Un tentativo d'inserimento degli aspetti estetici nello studio di fattibilità delle difese marine dall'erosione*. *Agribusiness Paesaggio & Ambiente*, 11 (1): 68-77.
- De Angelis G. e Venzi L. (2006) - *Coast protection from erosion: a socio-economical analysis of beach nourishment (the case of Ladispoli beach)*. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on the Management of Coastal Recreational Resources, Gozo, Malta 25-27 Oct. 2006, pp. 1-14.
- EUROSION (2007) - *Vivere con l'erosione costiera in Europa. Risultati dello Studio EUROSION*. Commissione Europea. Edizione italiana, 38 pp.
- Ferri S., Pelliccia F., Pranzini E., Rizzo M. e Vitale G. (2008) - *Prima risposta della spiaggia di Marina di Carrara ad un ripascimento artificiale non protetto*. *Studi costieri*, 15: 57-72.
- GNRAC (2006) - *Lo stato dei litorali italiani*. *Studi costieri*, 10: 5-176
- Gravens M.B., Emersole B.A., Walton T.L. e Wise R.A. (2002) - *Beach Fill Design*. In: *Coastal Engineering Manual*, Parte 5 Ed.: Donald L. Ward, Cap. 4, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, pp. 109.
- Grove S.H. (2007) - *Physical aspects of Southern California beaches and how people perceive them: considerations for beach nourishment planning*. *Shore & Beach*, 75: 11-21.
- Leatherman S.P. (1997) - *Beach rating: A methodological approach*. *Journal of Coastal Research*, 13: 253-258.
- Morgan R. (1999) - *Preferences and priorities of recreational beach users in Wales, U.K.* *Journal of Coastal Research*, 15: 653-667.
- Nordstrom K.F., Jackson N.L. e Pranzini E. (2004) - *Beach sediment alteration by natural processes and human action: Elba Island, Italy*. *Ann. Ass. Am. Geogr.*, 94: 794-806.
- Oleari C. (2008) - *Colorimetria*. In *Misurare il colore*, a cura di C. Oleari, Hoepli, Milano. Pp. 139-245.
- Pranzini E. (2004) - *La forma delle coste*. Zanichelli, Bologna, 245 pp.
- Pranzini E. (2009) - *Protection studies at two recreational beaches: Poetto and Cala Gonone beaches, Sardinia, Italy*. In: *Beach Management*, Allan Williams e Anton Micallef Eds., Earthscan publishers. In stampa.
- Williams A.T. e Morgan R. (1995) - *Beach awards and Rating systems*. *Shore & Beach*; 63: (4) 29-33.

**Manoscritto ricevuto il 15/11/2008; accettato il 16/12/2008.**

## Progetto sperimentale di iniezione d'acqua in unità geologiche profonde per il controllo della subsidenza costiera: il caso di studio di Lido Adriano (Ravenna)

Diego Vicinanza<sup>1</sup>, Paolo Ciavola<sup>2</sup>, Simona Biagi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile - CIRIAM, Seconda Università di Napoli - Via Roma n.29 - 81031 Aversa (CE), Tel.: +39 081 5010245, Fax: +39 081 5037370, Email: diegovic@unina.it

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara - Via Saragat n. 1 - 44100 Ferrara, Tel.: +39 0532 974622, Fax ++39 0532 974767, Email: cvp@unife.it

<sup>3</sup>Eni S.p.A. Div. Exploration & Production, Unità Geografica Italia - Via del Marchesato n. 13 - 48023 Marina di Ravenna (RA), Tel.: +39 0544 512013, Fax +39 0544 512052, Email: simona.biagi@eni.it

### Riassunto

La costa emiliano-romagnola è soggetta a fenomeni di subsidenza naturale dovuta essenzialmente a cause tettoniche e a compattazione degli strati di sedimento quaternari. Il fenomeno ha subito un generale incremento a partire dalla fine degli anni '50, con valori dei cedimenti che sono passati da millimetri a qualche centimetro all'anno. Si è accertato che l'estrazione d'acqua dal sottosuolo è stata la causa principale di tale incremento, mentre si ritiene che solo per limitati tratti del litorale romagnolo la produzione di gas da alcuni giacimenti on/offshore posti in prossimità della costa ravennate possa anche avere contribuito alla subsidenza totale osservata.

La memoria descrive i primi risultati di un esperimento di campo "unico" al mondo presso la località Lido Adriano (Ravenna) per il controllo della subsidenza costiera. Il progetto, iniziato nel Marzo del 2003, ha come obiettivo principale il mantenimento della pressione del giacimento di gas denominato "Angela-Angelina", mediante iniezione d'acqua in unità geologiche profonde (circa 4000 m). I risultati preliminari analizzati durante la fase di iniezione iniziale sono stati incoraggianti. Durante questa fase sono stati iniettati 150 m<sup>3</sup>/giorno (160.000 m<sup>3</sup> in totale). Il monitoraggio effettuato durante il periodo 2003-2006 ha mostrato un incremento di pressione di 25 bar causati dall'attività di iniezione d'acqua. Il progetto prevede nel suo sviluppo futuro un incremento della portata fino a 2500 m<sup>3</sup>/giorno. Un aspetto interessante, dal punto di vista della sostenibilità ambientale del progetto, è l'utilizzo dell'acqua di mare per l'iniezione in falda profonda, adoperando l'acqua captata dal sistema di drenaggio BMS (Beach Management Systems) installato sulla spiaggia, ed avente anche la finalità di stabilizzare l'arenile.

**Parole chiave:** subsidenza costiera, controllo della subsidenza, iniezione d'acqua, BMS, RSA.

### Abstract

*The Emilia-Romagna coastline (Northern Italy) is affected by subsidence generated by tectonic processes through compaction and deformation of Quaternary sediments. Subsidence has been increasing starting from the end of 50's, shifting from rates of millimetres to several centimetres per year. It has been recognized that the subsurface water extraction has been the main cause of this increase, while it is felt that only for some parts of such coastline the gas production from a few on/offshore fields located very near to the Ravenna coast could also have contributed to the total observed subsidence.*

*The paper reports the first results from a unique field experiment taking place at Lido Adriano (Italy). The project started in March 2003 having as main object the pressure maintenance of the gas reservoir, obtained by injection of sea water at about 4000 m depth. Preliminary results analysed during the early injection phase were encouraging. During this period 150 m<sup>3</sup>/day were pumped down (a total of 160.000 m<sup>3</sup>). The pressure monitoring during the period 2003-2006 showed an increase*

*of pressure of 25 bars due to the injection activity. In the future the project will increase the injection rate to 2500 m<sup>3</sup>/day. An interesting "environmentally sustainable" aspect of the project is the use of sea-water for reinjection, using water collected through BMS (Beach Management System) that has also the role of stabilizing the beach and contrast erosion trend.*

**Keywords:** *coastal subsidence, subsidence control, water injection, BMS, RSA.*

## Introduzione

In Italia, a tutt'oggi, circa il 40% delle spiagge è in erosione, così come riportato in "Lo stato dei litorali italiani", pubblicato sulla rivista Studi Costieri (AA.VV., 2006). Le cause sono comunemente da ascrivere all'azione del moto ondoso e delle correnti da esso indotte, nonché al ridotto apporto di materiale solido trasportato dai corsi d'acqua, alla distruzione delle dune costiere ed alla costruzione di opere marittime. Accanto a tali cause, se si considerano scale temporali di media estensione (10-100 anni), possono risultare non trascurabili, ai fini della dinamica litoranea, anche gli effetti indotti da fenomeni di subsidenza del fondale, con ripercussioni talvolta anche vistose.

Come è noto i fenomeni di subsidenza sono indotti da cause naturali o antropiche. Nel primo caso, la subsidenza è rappresentata da un lento abbassamento della crosta terrestre di ampiezza pari a qualche mm/anno provocato, nella maggior parte dei casi, dal costipamento dei sedimenti incoerenti dovuto al peso di quelli sovrastanti o da movimenti del substrato roccioso.

La subsidenza antropica è invece dovuta essenzialmente all'attività dell'uomo, in particolare all'estrazione di fluidi dal sottosuolo (acqua, petrolio, gas, ecc.) ed al prosciugamento di valli e di terreni paludosi. Pur essendo anche questo tipo di subsidenza un fenomeno che si manifesta in modo lento e graduale, esso è in generale caratterizzato da un'evoluzione temporale più rapida e da abbassamenti del suolo più elevati rispetto alla subsidenza naturale.

Quando il fenomeno di subsidenza avviene in prossimità della fascia costiera esso inevitabilmente innesca un complesso fenomeno di interazione con l'evoluzione naturale della linea di riva. Esso rappresenta un problema di notevole complessità trattandosi di un processo di interazione fortemente non lineare tra i cedimenti della spiaggia emersa e sommersa per effetto della subsidenza e le sue modificazioni morfologiche (erosione o accrescimento) dovute alla sollecitazione del modo ondoso.

La costa emiliano-romagnola è soggetta al fenomeno della subsidenza naturale dovuta a cause tettoniche e a compattazione degli strati di sedimenti quaternari.

L'analisi dei dati ricavati dalle campagne di misura effettuate dall'Istituto Geografico Militare, Idroser e Comune di Ravenna evidenzia come tutta l'area ravennate sia caratterizzata da elevati valori di abbassamento (Regione Emilia-Romagna-Idroser Agenzia, 1996). Nel periodo 1892-1950 la subsidenza a Ravenna città è stata di circa 4 mm/anno, tra il 1959 e il 1970 di circa 25 mm/anno, tra il 1970 e il 1977 di circa 40 mm/anno (valore più alto registrato). Negli ultimi 20 anni il fenomeno risulta in riduzione, pur rimanendo su valori pari a 20 mm/anno, decisamente superiori alla soglia naturale (Regione Emilia-Romagna-Idroser Agenzia, 1996).

La fascia costiera ravennate è stata oggetto di monitoraggio geodinamico fin dai primi anni del secolo scorso. Diversi sono stati, e tuttora sono, gli enti nazionali, regionali, locali che si sono occupati della misurazione degli spostamenti verticali del territorio attraverso l'utilizzo di diverse metodologie quali livellazione geometrica, GPS, interferometria differenziale SAR e l'analisi interferometrica su diffusori puntuali. A tal proposito è stato recentemente realizzato il rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola affidata ad ARPA dalla Regione Emilia-Romagna ([http://www.arpa.emr.it/ingamb/rr\\_subsidenza\\_satelliti.htm](http://www.arpa.emr.it/ingamb/rr_subsidenza_satelliti.htm)). In essa viene anche presentato l'andamento delle velocità medie di abbassamento del suolo nel periodo 2002-2006 per la fascia costiera romagnola e il relativo entroterra. Le prime serie storiche che si sono rese disponibili per la ricostruzione dell'andamento della subsidenza a scala comunale sono i dati storici di IGM e del Consorzio di Bonifica di Ravenna, nonché

le livellazioni geometriche fatte eseguire dal Comune di Ravenna. La subsidenza del territorio ravennate è stata periodicamente controllata dal Comune attraverso una serie di campagne di livellazione geometrica effettuate su una rete composta da oltre 700 capisaldi, per un totale di 640 km di linee distribuiti uniformemente su tutto il territorio comunale. Le misure sono state eseguite seguendo idonee specifiche tecniche, che impongono il rispetto di prefissati valori di tolleranza relativamente allo scarto quadratico medio sulle compensazioni di rete e alle chiusure degli anelli formati dalle linee di livellazione. Nel tempo si è arrivati ad un infittimento delle linee di livellazione lungo la fascia costiera su quasi tutta l'estensione comunale.

Di rilevante interesse per la previsione dei tassi di subsidenza e dei potenziali effetti causati dalla produzione di gas nell'area costiera di Ravenna è il lavoro svolto da un gruppo di ricercatori nazionali e internazionali. Questo gruppo di lavoro ha portato a termine recentemente uno studio interdisciplinare per la modellazione e previsione dei comportamenti del giacimento metanifero di Angela-Angelina (Ravenna), ubicato nelle immediate vicinanze della costa ravennate. La subsidenza indotta dall'estrazione di gas e i suoi effetti sull'ambiente, in particolare sulla morfologia costiera, sono riportati in un volume speciale pubblicato per il settimo simposio internazionale sulla subsidenza, svoltosi in Cina nell'Ottobre del 2005 (AA.VV., 2005).

Di particolare interesse per questo lavoro risulta, tra le altre, la memoria di Barends et al. (2005a) riguardante le informazioni disponibili lungo la costa ravennate relativamente ai tassi di subsidenza indotti dall'estrazione del gas. I dati raccolti dagli Autori relativi agli studi precedentemente svolti nell'area in esame possono così essere riassunti:

- dati di livellazioni eseguite dall'IGM nel periodo 1877-1903 e 1950-1956 (Salvioni, 1957) riportati in Teatini et al. (2005). I valori medi di subsidenza possono considerarsi compresi tra 0.4 - 0.7 cm/anno e sono da ritenersi di origine naturale in quanto la quantità di estrazione di acqua da falda della Provincia di Ravenna era ancora molto bassa;
- Gambolati e Teatini (1998) utilizzando le elaborazioni di Salvioni (1957) stimarono che la subsidenza naturale nella Provincia di Ravenna fosse compresa tra 0.15-0.25 cm/anno;
- Teatini et al. (2005), rivedendo tutti i dati disponibili nel periodo compreso tra il 1897-2002 (Fig. 1), valuta che i valori da attribuire alla subsidenza naturale siano compresi tra 0.55-0.7 cm/anno. Risulta altresì evidente un incremento di 4.6 cm/anno nel periodo 1950-1977. Tali incrementi di subsidenza, chiaramente di natura antropica, sono da attribuirsi alla captazione di acqua da falda superficiale avvenuta per scopi civili ed industriali. Dopo il 1977, infatti, con una diminuzione di questa captazione, i valori si sono notevolmente ridotti.

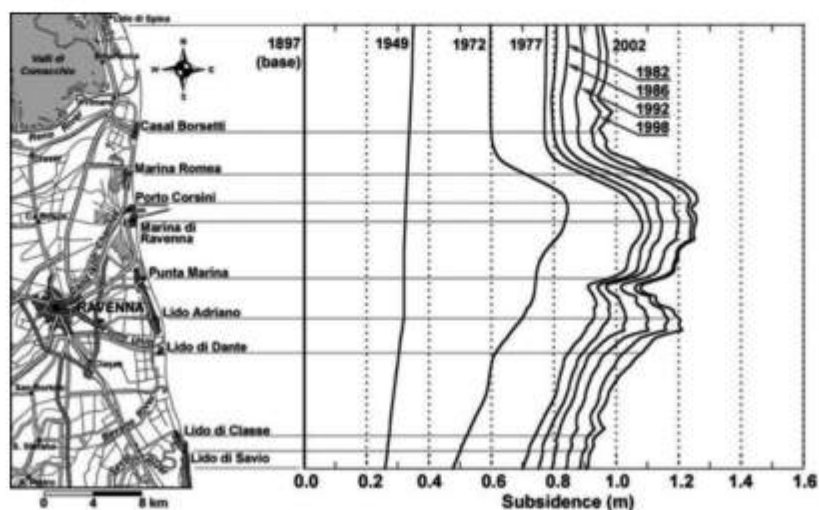


Figura 1 - Subsidenza costiera ravennate nel tempo dopo Teatini et al. (2005).



Sulla base degli studi fatti da Polo (2002) e Teatini et al. (2005), Houtenbos et al. (2005) stimano che un valore medio di subsidenza naturale possa essere valutato nell'ordine di 4-5 mm/anno (Figg. 1 e 2). Per ciò che concerne la valutazione della subsidenza antropica indotta dall'estrazione di gas, Houtenbos et al. (2005) fanno riferimento ai dati di cinque monitoraggi (livellazioni) effettuati dal Comune di Ravenna durante il periodo 1982-2002. Gli Autori valutano che nel suddetto periodo l'estrazione di gas abbia contribuito alla subsidenza antropica mediamente nella misura di 0.29 cm/anno a Fiumi

Uniti e di 0.24 cm/anno a Lido di Dante.

Il confronto tra questi dati e le previsioni del modello matematico di Schroot et al. (2005) al centro del campo *offshore* di estrazione metanifera Angela-Angelina mostra un incremento della velocità di subsidenza per il periodo 2003-2015 (Fig. 3), seguito da un *rebound* negli anni successivi. Infine, Barends et al. (2005b) evidenziano come questa previsione degli incrementi di subsidenza (9 cm nel periodo 2003-2015), accoppiati con prevedibili incrementi del livello medio del mare, potrebbero modificare l'attuale assetto geomorfologico dell'area e, quindi, richiedere miglioramenti delle attuali misure di protezione costiera nella zona compresa tra Lido di Dante e Lido Adriano.

Negli ultimi anni, proprio alla luce dei monitoraggi fatti e delle ricerche scientifiche in corso, la Regione Emilia Romagna ha cercato di approfondire gli studi mirati al contenimento dei suddetti fenomeni, alla luce dei quali, pur riconoscendo nel gas naturale una delle risorse di maggiore rilevanza del territorio, ha comunque altresì evidenziato la necessità di limitare o eliminare gli effetti di subsidenza innescati dalla estrazione del gas attraverso l'utilizzazione delle migliori tecnologie disponibili e di scelte gestionali ispirate a modelli di sviluppo sostenibile.

A seguito di ciò, in data 12/10/2002 è stato sottoscritto tra, Comune di Ravenna, Provincia di Ravenna, Regione Emilia Romagna ed Eni S.p.A un Protocollo di Intesa avente come obiettivo "la realizzazione di un progetto sperimentale sulla iniezione di acque nel pozzo a terra Angelina 1, ai fini del controllo e mantenimento della pressione degli acquiferi di livelli produttivi e la fattibilità di tecniche innovative di stabilizzazioni e recupero della spiaggia a basso impatto ambientale". Il progetto sperimentale è stato realizzato, sotto la denominazione "Progetto Angela-Angelina pressure maintenance". A fronte dei confortanti risultati ottenuti, si è deciso di rinnovare il Protocollo di Intesa tra i medesimi soggetti firmatari (27/04/2006, durata triennale), con l'intento di far progredire i risultati ottenuti nella prima fase ed arrivare ad un incremento della portata di acqua di mare da iniettare, destinata in questo caso alla immissione

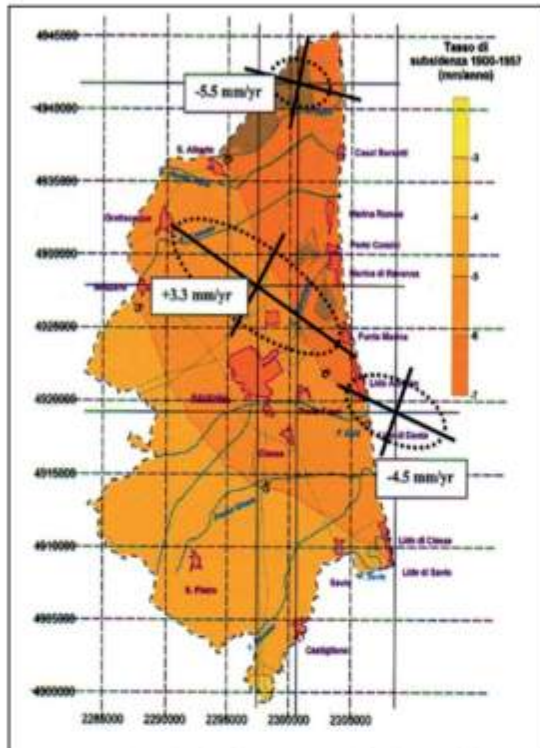


Figura 2 - Tasso di subsidenza naturale nel periodo 1900-1957 da Polo (2002).

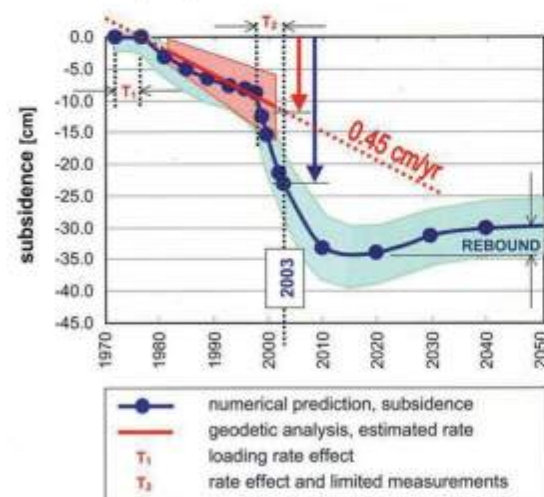


Figura 3 - Confronto tra le previsioni del modello di Schroot et al. (2005) e i valori stimati dall'analisi geodetica di Houtenbos et al. (2005), da Barends et al. (2005).

in pozzi localizzati nel campo di Angela-Angelina, ubicato a largo di Lido Adriano (Ravenna). È quindi stato avviato il progetto denominato *"Angela-Angelina water injection"*, attualmente in corso. Questa memoria descrive i risultati sperimentali ottenuti nell'ambito di questo progetto di ricerca che rappresenta un caso "unico" al mondo per il controllo della subsidenza.

### **Stato dell'arte sull'iniezione di acqua nei giacimenti di idrocarburi**

#### ***Giacimenti di petrolio***

L'iniezione d'acqua nei giacimenti di petrolio è un processo industriale consolidato, largamente impiegato da tutti gli operatori a scala mondiale.

Considerazioni teoriche, studi di laboratorio e, soprattutto, risultati di campo hanno ampiamente dimostrato che l'applicazione di tale processo consente in generale d'incrementare la percentuale di recupero di petrolio mantenendo nel contempo elevate le portate dei pozzi. Tale effetto positivo è principalmente conseguenza:

- del sostentamento della pressione di giacimento che viene mantenuta ad un livello prefissato (di norma inferiore o uguale al valore iniziale);
- della sostituzione del petrolio nei pori della roccia serbatoio con l'acqua iniettata, e della spinta dello stesso da parte dell'acqua verso i pozzi produttori (il cosiddetto "spiazzamento").

Poiché il mantenimento di pressione contrasta e/o annulla la compattazione degli strati mineralizzati costituenti il giacimento, compattazione che è la causa della subsidenza, l'iniezione d'acqua è stata proposta ed applicata come una delle misure atte a prevenire/mitigare la subsidenza stessa.

Una delle prime applicazioni dell'iniezione d'acqua in giacimenti di petrolio eseguita a tale scopo, ovvero per mitigare la subsidenza, si è avuta nel caso del campo di Wilmington (California).

Questo campo è costituito da 7 livelli di sabbia consolidata alternati ad argilla, posti a profondità compresa fra i 750 m e 1800 m e mineralizzati ad olio medio-pesante. Poco dopo l'entrata in produzione nel 1936, si sono manifestati i primi segni di subsidenza che è andata progressivamente aumentando sino a raggiungere complessivamente i 7.9 m nel 1958.

L'ubicazione del giacimento, posto al di sotto della città di Long Beach e del relativo porto, e l'entità del fenomeno hanno indotto le Autorità di controllo e l'operatore ad avviare nel 1958 un progetto pilota d'iniezione d'acqua di mare per arrestare o quanto meno mitigare la subsidenza (Fig. 4).



Figura 4 - Effetto della subsidenza su di un idrante nel porto di Long Beach (Foto tratta da [http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ozsvath/images/long\\_beach\\_subsidence.htm](http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ozsvath/images/long_beach_subsidence.htm)).

I risultati positivi di tale progetto pilota hanno portato nel decennio 1958-1968 a estendere la *water injection* a tutto il giacimento che è stato ripressurizzato su valori pari a circa 80%-90% della pressione iniziale. A partire dal 1968 la subsidenza si è arrestata praticamente in tutto il campo, e addirittura in alcune zone si è avuto un parziale risollevarimento della superficie del suolo pari a circa il 10% del valore della subsidenza raggiunta in precedenza. Il successo del progetto d'iniezione d'acqua nel campo di Wilmington ha indotto altri operatori ad utilizzare lo stesso processo per mitigare/arrestare la subsidenza nei giacimenti ad olio pesante della California. A titolo esemplificativo si può ricordare il caso del campo di Beverley Hills ubicato in corrispondenza della parte Sud dell'abitato della città di Los Angeles, in zona, quindi, fortemente urbanizzata. In tale campo, entrato in produzione nel 1966, il manifestarsi di lievi fenomeni di subsidenza ha portato a realizzare nel 1969 un progetto pilota d'iniezione d'acqua per il mantenimento della pressione; progetto che nel periodo 1969-1974 è stato progressivamente esteso a tutto il giacimento. A partire dal 1974, data alla quale la subsidenza massima aveva raggiunto un valore di circa 1200 mm, la subsidenza stessa si è praticamente arrestata confermando l'efficacia dell'iniezione d'acqua come misura di mitigazione.

Un caso più recente, che ha avuto larga risonanza mediatica, è quello del giacimento di Ekofisk ubicato *offshore* nel Mare del Nord. A circa metà degli anni '80 l'operatore (Conoco-Phillips), infatti, verificò che la produzione di olio aveva innescato un importante fenomeno di subsidenza (velocità di abbassamento del fondo mare dell'ordine di 40 cm/anno) che metteva a rischio la sicurezza delle piattaforme, dei pozzi e degli impianti d'estrazione. L'operatore intervenne con una duplice azione: sollevamento delle piattaforme di circa 6 m con una gigantesca opera d'ingegneria, e avvio di un progetto d'iniezione d'acqua di mare su tutto il giacimento per il mantenimento di pressione.

L'efficacia dell'iniezione d'acqua nel contrastare la subsidenza ad Ekofisk si è, però, manifestata più lentamente che nei campi californiani sopra citati a causa della natura della roccia serbatoio di tale giacimento. Quest'ultima, infatti, non è costituita da sabbie più o meno consolidate ma da un calcare molto poroso e "soffice" la cui resistenza meccanica viene indebolita dall'acqua di mare.

Ciò nonostante, a partire dalla metà degli anni '90, l'operatore ha riscontrato una notevole mitigazione del fenomeno della subsidenza con velocità di abbassamento del fondo mare che si sono ridotte a circa 15 cm/anno.

### ***Giacimenti di gas naturale***

Considerazioni teoriche e risultati di campo hanno mostrato che nel caso dei giacimenti di gas naturale l'iniezione d'acqua non sempre è un processo efficiente per la produzione d'idrocarburi in quanto tende a ridurre il recupero finale degli stessi. L'acqua, infatti, sia che venga iniettata sia che entri naturalmente in giacimento per decompressione degli strati acquiferi ad esso idraulicamente connessi, intrappola nei pori volumi importanti di gas che non sono più producibili.

Se in aggiunta a ciò si considera che l'espansione elastica del gas fornisce energia sufficiente alla sua produzione, si comprende come l'iniezione d'acqua sia di fatto mai applicata dagli operatori petroliferi nella coltivazione dei campi a gas.

Anche nel caso di fenomeni di subsidenza associati con la produzione di gas gli operatori, di concerto con le Autorità di controllo, preferiscono realizzare azioni di mitigazione degli effetti della subsidenza stessa che non intervenire a livello di giacimento mantenendone la pressione con iniezione d'acqua.

È questo il caso ben noto dei giacimenti olandesi di Groningen e Ameland per i quali è prevista una subsidenza massima a fine produzione rispettivamente di circa 42 cm e di circa 28 cm. Tali valori sono accettati dalla pubblica opinione e dalle Autorità di controllo, pur essendo tali giacimenti ubicati in prossimità delle coste, in zone dal delicato equilibrio ambientale.

Il fatto che l'iniezione d'acqua non sia utilizzata come tecnica di coltivazione per i campi a gas è una scelta dettata soltanto da valutazioni economiche; ciò non significa, però, che non sia tecnicamente



fattibile o che non possa essere impiegata per mitigare la subsidenza indotta dalla produzione. Infatti, il sostentamento della pressione di giacimento che deriva dall'iniezione nei campi a gas è del tutto identico a quello descritto in precedenza per i giacimenti di petrolio. Del tutto analogo è, quindi, anche l'effetto di ridurre/annullare la compattazione dei livelli mineralizzati e di mitigazione della subsidenza.

Da quanto sopra esposto è evidente che sia il progetto pilota di *water injection* avviato nel pozzo Angelina 1 nel marzo 2003 sia la futura estensione, con conversione di due pozzi produttori in iniettori, rappresenta un'iniziativa altamente innovativa e, di fatto, un "unicum" a scala mondiale.

### **Progetto Angelina Pressure Maintenance**

Le basi sulle quali è stato realizzato il progetto *Angelina Pressure maintenance* sono esplicitate nel Protocollo di intesa tra Regione Emilia Romagna, Comune di Ravenna, Provincia di Ravenna ed Eni. Una delle problematiche citate all'interno del documento ed individuate nell'ambito dell'allora vigente Programma Regionale di Tutela Ambientale 2001/2003 denominato "Piano di azione Ambientale per un futuro sostenibile", è rappresentata dalla stabilità delle coste Emiliano-Romagnole, in quanto l'ambiente litoraneo è caratterizzato da forti elementi di fragilità a causa della presenza di fenomeni di erosione costiera, di ingressione marina e di subsidenza naturale ed antropica. In tale documento si spiega inoltre come la Regione Emilia Romagna si stesse dotando di un Piano per la gestione integrata della Costa, che prevedeva tra l'altro studi mirati al contenimento dei fenomeni di erosione e subsidenza. Le parti firmatarie del Protocollo individuavano inoltre nel gas naturale una delle risorse più importanti del territorio, il cui utilizzo deve avvenire nell'ambito di una visione complessiva di sviluppo programmato, armonizzato con la valorizzazione degli altri beni e delle altre risorse esistenti. Il documento riconosce in Eni un soggetto deputato al soddisfacimento delle esigenze energetiche del Paese, nell'ottica della conservazione e salvaguardia dell'equilibrio territoriale ed ambientale, non potendo l'utilizzo delle risorse energetiche essere disgiunto dalla tutela dell'ambiente, coerentemente alle politiche di sostenibilità ambientale previste dalla legge.

Alla luce di tutto ciò, le parti firmatarie del Protocollo si sono impegnate, tramite lo strumento dello stesso Protocollo e sotto la supervisione di un Comitato Scientifico scelto d'intesa tra Comune ed Eni, a collaborare alla realizzazione di un progetto sperimentale finalizzato a limitare i fenomeni di compattazione in livelli produttivi a gas e quindi a limitare eventuali effetti impattanti a livello di superficie.

Si è dato seguito al perseguimento degli obiettivi su esposti attraverso un progetto che ha previsto i seguenti interventi:

1. intervento sperimentale di mantenimento e ri-pressurizzazione degli acquiferi di livelli produttivi nell'area di costa tramite l'iniezione di acque nel pozzo *onshore* Angelina 1, ubicato in località Lido Adriano (Ravenna);
2. validazione sperimentale di una tecnica innovativa e a basso impatto ambientale per la stabilizzazione di una porzione di arenile (BMS), che prevede l'utilizzo dell'acqua di mare ai fini dell'iniezione sopra descritta;
3. valutazione dell'efficacia e dell'impatto di tali operazioni di iniezione, svolte in contemporanea alla produzione di gas, in termini di contenimento di fenomeni di erosione e subsidenza.

Si analizzano nel seguito le modalità con cui sono stati attuati gli interventi.

### **Scelta del sito**

Già all'interno del Protocollo di Intesa veniva individuato il campo Angela-Angelina, ed in particolare il pozzo Angelina 1 (Fig. 5), come laboratorio di attuazione del progetto, in virtù delle seguenti considerazioni:



- l'ubicazione *onshore* del pozzo Angelina favorisce logisticamente qualsiasi processo di controllo si intenda attivare, con particolare attenzione all'evoluzione delle pressioni dei livelli iniettati;
- la vicinanza alla Centrale di Ravenna Mare ed alle sue strutture assicura un impatto ambientale assolutamente contenuto;
- il sito di Angelina 1 era già predisposto per un'analisi altimetrica integrata in quanto già inserito nella rete Eni di livellazione geometrica di alta precisione, dotato di un CGPS e di 2 riflettori SAR ed inoltre controllato mediante monitoraggio piezometrico-assessimetrico (Fig. 6).



Figura 5 - Ubicazione sito - foce dei Fiumi Uniti (Ravenna).

Il complesso strutturale di Angela/Angelina e Ravenna Mare Sud è situato nell'*offshore* Nord Adriatico a circa 3 km dalla costa Romagnola nella concessione denominata A.C27.EA di proprietà 100% Eni (Fig. 5).

Il pozzo Angelina 1, perforato nel 1972, è ubicato sulla terraferma sul fianco Nord-Occidentale del campo di Angela-Angelina, in prossimità della foce dei Fiumi Uniti.

La foce attuale del fiume si trova a Nord dell'abitato di Lido di Dante ed il corso del fiume devia verso Nord a circa 1,5 km dallo sbocco a mare. Sulla sponda sinistra dell'area di foce si osserva una spiaggia con caratteristiche miste di tipo fluviale e marino, dato che è influenzata sia dai processi di moto ondoso che di tipo fluviale. Il margine settentrionale di quest'ultima è adiacente ad una massicciata che protegge i terreni coltivati retrostanti e l'impianto di proprietà Eni.

Al fine di comprendere la stabilità della zona di foce a livello morfologico (Billi et al., 2007) hanno svolto una breve analisi dei voli aerei disponibili presso la banca dati della Regione Emilia-Romagna. Si sono scelti 5 voli, rispettivamente del 1943, 1982, 1996, 2002 e 2005. Un ulteriore confronto è infine stato ottenuto tramite la Carta Tecnica Regionale (1978).

Si presentano in questo lavoro solo ingrandimenti della zona di foce dai voli del 1943, 1996 e 2002 (Fig. 7).

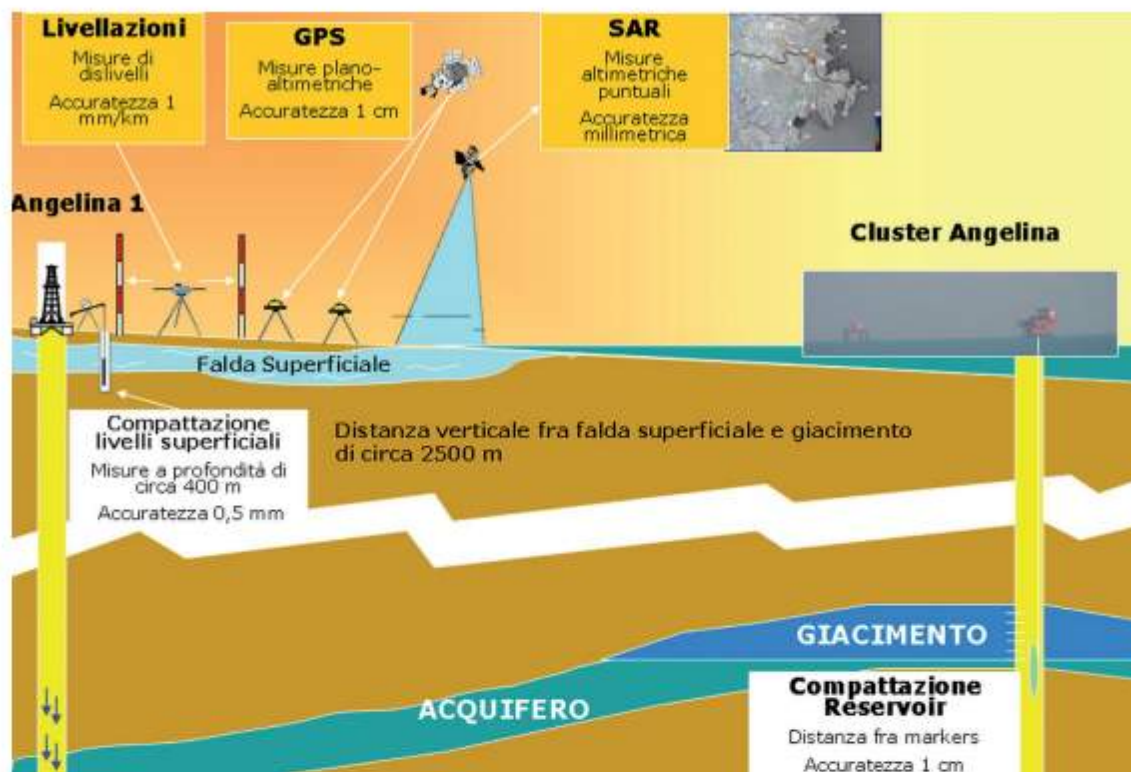


Figura 6 - Monitoraggio adottato.

Prima della fine della Seconda Guerra Mondiale l'abitato di Lido di Dante era inesistente e sulla sponda destra della foce si trovava un'ampia zona occupata da cordoni dunari e zone umide di retrobarriera.

La sponda sinistra presentava un sistema di barre e bassifondi associati ad una piccola freccia litorale che sembrava indicare un trasporto verso la bocca del fiume. Complessivamente la spiaggia era ampia, con larghezze superiori ai 100 m. Nelle immagini del volo della RAF (1943) non si vede un delta sommerso. Un elemento di spicco è il fatto che la costa, a Nord della foce, era orientata NE-SW, in contrasto con l'orientamento attuale. Tra gli anni '70 ed '80 si nota innanzi tutto un consistente impatto antropico lungo le sponde del fiume, ora occupate da insediamenti per la pesca con reti a "bilancino". Tra l'altro in seguito al cambio di orientamento della costa a Nord della foce, ora allineata NNW-SSE, la sponda settentrionale della foce continuava in parte ad essere occupata da vegetazione di tipo palustre, legata agli apporti di acqua dolce da parte del fiume, ma la spiaggia rimaneva comunque larga.

La variazione nell'orientamento della costa e queste ultime osservazioni fanno presupporre che l'apporto solido non fosse più sufficiente a garantire una condizione di equilibrio e che il delta sommerso fosse entrato in una fase erosiva. L'elemento più evidente, a cavallo degli anni '90, è la totale scomparsa della spiaggia a Nord della foce, con conseguente costruzione della massicciata in massi, presente attualmente per proteggere i terreni agricoli, e la centrale Eni ora visibile in alto a sinistra nelle immagini di Figura 7. L'ampiezza della spiaggia, oggetto a sinistra della foce, si è ridotta a poche decine di metri, mentre si nota la formazione di una piccola freccia litorale a parziale occlusione della foce fluviale. Da notare infine che un esame dei rilievi batimetrici, svolti da ARPA nel 2000, non identificano particolari morfologie a cavallo dell'isobata 2 m. Da un esame più attento di tali rilievi si nota però che la densità delle linee batimetriche non era forse sufficiente a risolvere le morfologie sommerse.



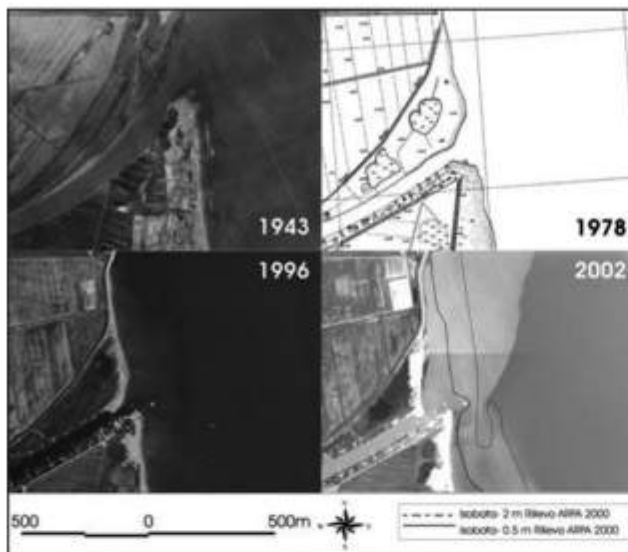


Figura 7 - Evoluzione storica della zona di foce tra il 1943 ed il 2002. Il volo 1996 (AIMA) e 2002 (AGEA) sono di proprietà della CGR Parma, su cessione del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (da Billi et al., 2007).

### Il pozzo Angelina 1

Il pozzo Angelina 1 era mineralizzato a gas nel livello PL-F e al top del livello PL1-K. Il pozzo, completato nel solo PL-F, ha prodotto dal Settembre 1973 al Settembre 1999 ed è stato chiuso per elevata produzione di liquidi di strato (Fig. 8). La produzione cumulativa a tutto il 1999 è stata di 580 MSm<sup>3</sup> (Milioni di metri cubi Standard).

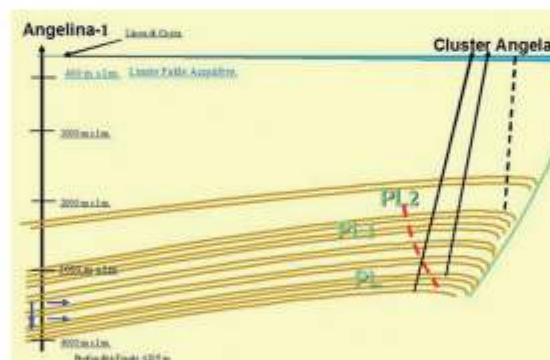


Figura 8 - Profondità dei livelli di produzione.

A partire dal Febbraio 2002 il pozzo Angelina 1 è stato oggetto di interventi, il cui obiettivo era la conversione, mediante approfondimento, del pozzo Angelina 1 da produttore a iniettore. Il progetto iniziale prevedeva lo scompletamento con chiusura mineraria del pozzo Angelina 1 e successivamente l'attraversamento e il completamento dai livelli oggetto di iniezione con un nuovo foro in side track. A scompletamento avvenuto, previo accertamento dello stato del casing e della cementazione, è stata appurata la possibilità di utilizzare il foro precedente. Il pozzo è stato quindi approfondito verticalmente, raggiungendo la profondità di 4205 m.

A valle dell'intervento, il pozzo era pronto per l'avvio del processo di iniezione, in cui possono essere distinte due fasi di attività:

- prima fase (*early injection*): iniezione acqua di strato prodotta dal campo, realizzazione test di iniezione e monitoraggio pressioni (realizzata da Marzo 2003).
- seconda fase (a regime): iniezione acqua di mare (start up avvenuto a Gennaio 2006) nei livelli completati in Ang1ApprA e non soggetti a reiniezione di acqua di strato, che comunque continua in contemporanea sui livelli dedicati.

### **Fase di early injection (acqua di strato)**

In questa fase è avvenuta la sola iniezione di acque di strato, provenienti dal campo *offshore* di Angela-Angelina. Lo schema semplificato del flusso delle acque iniettate è illustrato nella Figura 9.

L'acqua di strato proveniente dall'*offshore* viene convogliata nella centrale gas di Ravenna Mare, dove subisce un processo di filtrazione a due stadi, finalizzato alla rimozione dei solidi sospesi trascinati dal fluido, e dove viene additivata con i prodotti chimici necessari all'ottimizzazione del processo di iniezione. Tramite apposita condotta viene poi inviata in area pozzo Angelina 1 alla pressione idonea all'immissione in giacimento.

Il processo di iniezione delle acque di strato in unità geologica profonda è stato autorizzato dalla Provincia di Ravenna, Settore Ambiente e Suolo, a valle di una Conferenza di Servizi nella quale si sono ottenuti i pareri favorevoli del Comune di Ravenna, della sezione provinciale dell' Arpa di Ravenna, dell'Azienda USL e della Regione Emilia Romagna - Servizio Tecnico di bacino Fiumi Romagnoli.

Il provvedimento ha tenuto inoltre conto del fatto che le acque di strato provenienti dal campo di Angela-Angelina appartengono agli stessi corpi geologici del pozzo destinato all'iniezione e che i corpi geologici recettori sono arealmente e verticalmente isolati tra loro e isolati dalle falde acquifere superficiali.

Il provvedimento ha contestualmente autorizzato l'additivazione delle acque di strato con prodotti biocidi ed inibitori di corrosione secondo concentrazioni definite e fisse, ritenuta necessaria al fine di garantire l'efficacia del processo di iniezione ed il mantenimento dell'efficienza dei relativi impianti. Nel documento si elencavano una serie di prescrizioni relative a:

1. condizioni di iniezione, dettate soprattutto dalla necessità di monitorare le quantità di acqua di strato immesse nella formazione; l'autorizzazione rilasciata imponeva infatti un quantitativo massimo giornaliero iniettabile di 150 m<sup>3</sup>/g ed un quantitativo annuo massimo di 55000 m<sup>3</sup>;
2. caratteristiche chimico fisiche, vista la necessità di monitorare sia la composizione delle acque iniettate che la loro compatibilità con le acque della formazione ricevente;
3. andamento delle pressioni dei livelli interessati all'iniezione, dovute alla necessità di verificare se il processo di iniezione è in grado di dar luogo a fenomeni di ripressurizzazione del giacimento.



Figura 9 - Schema semplificato del flusso delle acque iniettate nella fase di *early injection*.

Per quanto riguarda il primo punto, in Figura 10 vengono mostrati i parametri più significativi dell'iniezione:

- portata giornaliera;
- quantità cumulativa di acqua iniettata nel periodo considerato;
- pressione di iniezione.

Nel periodo Marzo 2003 - Agosto 2006 è stata iniettata una quantità cumulativa di acqua di strato di oltre 183.294 m<sup>3</sup>. I bassi valori di pressione di iniezione che si evidenziano a partire dagli ultimi mesi del 2006 (Fig. 10) sono conseguenti ad un lavaggio del pozzo che ha ripristinato efficacemente la permeabilità della roccia.



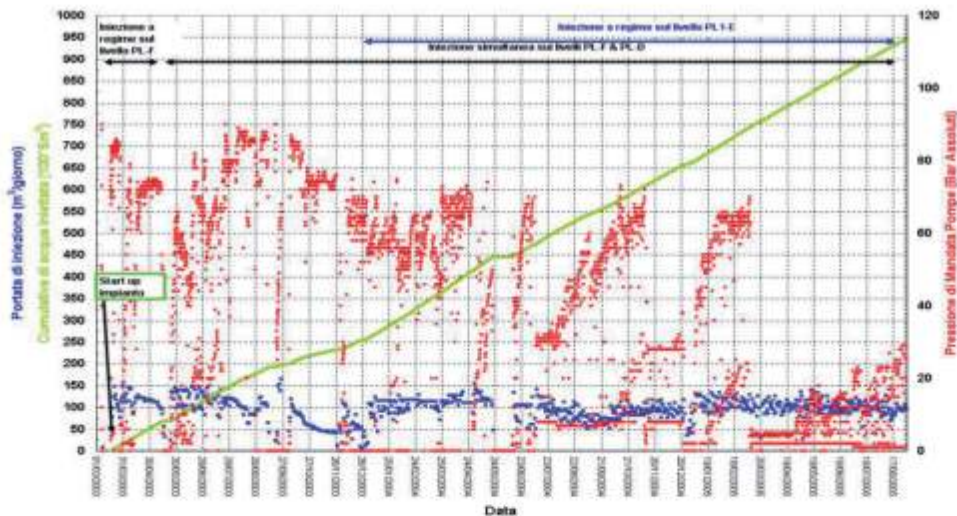


Figura 10 - Andamento dei parametri di iniezione di acqua di strato da start-up ad Agosto 2008.

Come prescritto in sede di autorizzazione all'iniezione, è stato previsto un programma di test di iniettività a cadenza regolare sul pozzo Angelina 1. Le prove di iniezione hanno confermato volta per volta l'indice di iniettività.

Contestualmente all'esecuzione di tali *test*, sono state effettuate misure di pressione statica di pozzo sui livelli interessati dall'iniezione delle acque di strato (livelli PL-F + D). Questa prova è mirata a valutare la capacità del processo di iniezione di favorire la ripressurizzazione, almeno nell'intorno della zona di iniezione.

La prima prova è stata realizzata il 30 Novembre 2003 ed ha fornito un dato di pressione statica di fondo pozzo pari a 228.66 bar. La seconda prova risale al 7 Luglio 2004, e ha dato un valore di pressione di 244.86 bar. La terza prova è stata effettuata il 26 Ottobre del 2006 e ha dato un valore di pressione statica di fondo di 249.7 bar. Tutti i valori sono riferiti al *datum* a 3839 m di profondità. L'analisi dei dati mostra come si sia avuto nell'arco di tempo considerato un aumento di circa 25 bar, dovuto all'attività di iniezione.

In conclusione, la fase di *early injection* ha dato risultati apprezzabili in termini di ripressurizzazione del giacimento, nelle immediate vicinanze del pozzo di iniezione. Per avere effetti apprezzabili anche sull'*offshore* oltre che nell'intorno del pozzo si conta sugli effetti di aumento della portata iniettata.

### Fase di iniezione a regime

Nel Gennaio 2006 si è iniziato ad iniettare acqua di mare tramite la *string* lunga del pozzo Angelina 1, aperta nei livelli PL1-E, PL1-K, PL1-Z e PL-K1, mentre l'iniezione di acqua di strato è proseguita nella *string* corta, aperta nei soli livelli PL-F+D (Tab. 2).

Si descrivono nel seguito gli interventi eseguiti per attuare questa fase di progetto. La portata di acqua di mare destinata alla reiniezione è stata fornita da un sistema innovativo denominato BMS (Beach Management System), ideato negli anni '80 dal Danish Geotechnical Institute, che, oltre a fungere da sistema di approvvigionamento dell'acqua mare, rappresenta un nuovo approccio per il controllo dell'erosione costiera e la salvaguardia delle spiagge. La sua struttura è molto semplice (Fig. 11) ed è costituita da un dreno posto parallelamente alla linea di riva al di sotto della linea di falda. La distanza dalla linea di riva e la profondità alla quale il dreno viene posto sono tra i motivi principali che decretano una maggiore o minore efficacia del sistema. Il dreno, attraverso un tubo di raccordo, convoglia l'acqua raccolta ad un pozzetto.

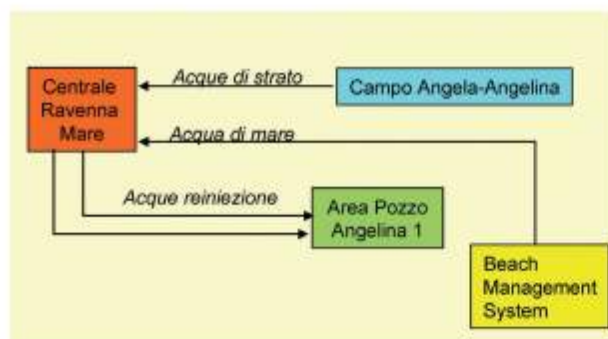


Figura 11 - Schema semplificato del flusso delle acque iniettate nella fase di regime.

Il processo, fino al pozzetto, avviene per gravità mentre da questo l'acqua viene espulsa per mezzo di una pompa. L'abbassamento della quota di saturazione provocato dalla presenza del dreno provoca l'aumento della capacità di infiltrazione della spiaggia, con il risultato di una sostanziale riduzione del flusso di ritorno e quindi della capacità erosiva con un conseguente accrescimento della spiaggia a cavallo della linea di riva. Infatti una capacità di filtrazione maggiore significa un minor trascinarsi di materiale solido (sabbia) da parte dell'onda di ritorno (*back-rush*).

Al fine di un corretto dimensionamento del sistema, si è proceduto nel Febbraio 2003 all'esecuzione di una campagna di indagini geognostiche e raccolta dati riguardanti il sito che, per la sua prossimità all'area di iniezione, era stato individuato, come il più idoneo alla realizzazione della sperimentazione, ovvero il tratto di arenile prospiciente il lato Nord della foce dei Fiumi Uniti, in località Lido Adriano (Ravenna).

Sulla base degli studi fatti, l'intero sistema di drenaggio è stato dimensionato per una portata di 400 m<sup>3</sup>/g. Il sistema BMS realizzato nel corso del 2004 sul tratto di litorale in esame è costituito da:

- due condotte di drenaggio, funzionanti in parallelo, di ca. 100 m ciascuna, ricoperte di materiale filtrante, collocate a profondità definita nella fascia di battigia longitudinalmente alla linea di costa;
  - tubi di convogliamento delle acque drenate verso la stazione di pompaggio;
  - una stazione di pompaggio per il deflusso dell'acqua drenata costituita da due pozzetti collettori;
  - una condotta di deflusso dell'acqua drenata, che verrà convogliata verso l'impianto di trattamento pre-iniezione situato all'interno della centrale Eni di Ravenna Mare;
  - una condotta di scarico a mare, utilizzata per riciclare a mare l'acqua captata sia in caso di eccesso (riciclo parziale), sia nel caso in cui l'impianto di iniezione a valle abbia problemi (riciclo totale).
- Considerato che le acque reflue del sistema sono costituite da acqua marina filtrata, non si hanno problemi di inquinamento, e per le attività di riciclo a mare è stata ottenuta una presa d'atto da parte della Provincia di Ravenna.

In una prima fase il BMS ha operato in ricircolo totale, attraverso un sistema di valvole ubicato in area pozzo Angelina 1. Nel frattempo sono stati realizzati gli impianti necessari per il processo di iniezione, in particolare:

1. Posa di una condotta in fiberglass interrata da 6" che collega il BMS alla centrale di Ravenna Mare e posa di due condotte interrate da 3" che collegano la centrale al pozzo iniettore Angelina 1.
2. Installazione dell'impianto di trattamento dell'acqua di mare nella centrale di Ravenna Mare.

L'acqua di mare in arrivo dalla condotta da 6" proveniente dal sistema BMS viene accumulata in due serbatoi della capacità di 15 m<sup>3</sup> ciascuno, operanti singolarmente o in parallelo. Da lì due pompe, anch'esse funzionanti singolarmente o in parallelo, inviano l'acqua ad una prima batteria di filtri a cartuccia con grado di filtrazione da 10 micron; dopo la prima filtrazione, l'acqua viene inviata alle pompe di iniezione, che la spingono ad uno secondo stadio di filtrazione costituito da filtri a cartuccia con grado di filtrazione da 3 micron. In uscita viene misurata e registrata la portata, poi una condotta in fiberglass interrata da 3" convoglia l'acqua al pozzo Angelina 1 (Fig. 12).



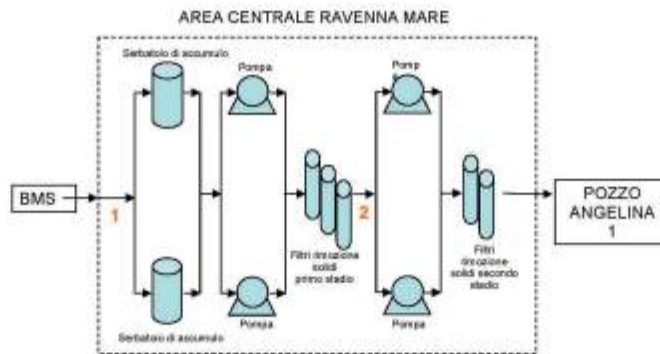


Figura 12 - Schema semplificato dell'impianto di trattamento dell'acqua di mare a monte dell'iniezione.

Il processo di iniezione di acqua mare e le modalità della gestione dello stesso sono stati sottoposti ad un iter autorizzativo che ha comportato, a valle del via libera del Gruppo di Lavoro, l'invio di opportuna istanza alla Provincia di Ravenna, che ha rilasciato apposito nulla osta riguardante il processo di iniezione in Angelina 1 nella sua globalità (acqua di mare e acqua di strato).

Il nulla osta ha fissato in un massimo di 300 m<sup>3</sup>/g la quantità totale di fluido iniettato (somma di acqua di strato più acqua di mare), per un totale massimo annuo di 110000 m<sup>3</sup>, in cui la frazione massima di acqua di strato non deve superare i 66000 m<sup>3</sup> annui e l'acqua di mare i 44.000 m<sup>3</sup> annui.

Contestualmente l'atto prevede di monitorare giornalmente le portate e le pressioni di acqua di mare, analogamente a quanto già stabilito per le acque di strato.

Dal momento che il sistema BMS, in termini di portata di acqua captata, è soggetto all'andamento delle condizioni meteo-marine, si è reso necessario provvedere ad un sistema che ricircolasse a mare l'eventuale eccesso di acqua captata.

La Provincia di Ravenna, esaminata la documentazione relativa alle modalità di sfioro a mare, ha concesso relativo nulla osta. Le disposizioni del provvedimento prevedono che le acque restituite debbano avere caratteristiche tali da non compromettere gli usi previsti per il corpo idrico superficiale recettore (acque marine costiere) nonché le esigenze di tutela dell'ecosistema marino, e che siano adottati tutti gli accorgimenti possibili per evitare che le acque siano contaminate da altri scarichi o per fenomeni di autoinquinamento, dal momento del prelievo a quello della restituzione.

L'iniezione di acqua di mare ha avuto inizio a Gennaio 2006 e prosegue tuttora (Fig. 13).

Analogamente a quanto mostrato per le acque di strato, anche per l'acqua di mare viene mostrato un diagramma con i principali dati di iniezione a tutto agosto 2008. In particolare la quantità cumulativa iniettata al 31/08/08 ammonta a 48.622 m<sup>3</sup>.

### Progetto Angela-Angelina Water Injection

La fase di progetto sperimentale ha dimostrato che il processo di iniezione permette di incrementare la pressione statica esistente all'interno del pozzo di iniezione, condizione basilare per contrastare i fenomeni di subsidenza. Tale risultato, verificato e validato dal Comitato Scientifico facente parte integrante del Gruppo di Lavoro di Progetto e costituito da Università di Ferrara, Università di Urbino, Seconda Università di Napoli, è stato alla base del rinnovo del Protocollo di intesa, siglato in data 27 Aprile 2006, tra Regione Emilia-Romagna, Provincia di Ravenna, Comune di Ravenna ed Eni.

Con tale atto gli enti firmatari hanno sancito la volontà di raggiungere obiettivi di iniezione più ambiziosi, mirati al conseguimento di una ripressurizzazione ancor più significativa ed estesa su più ampia scala.

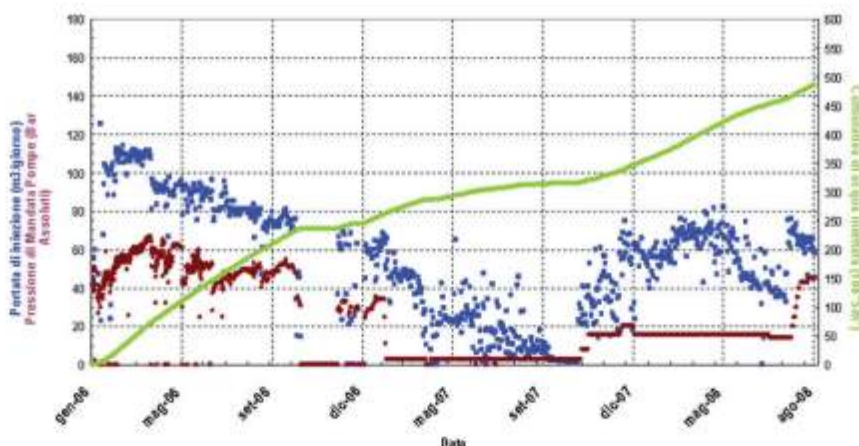


Figura 13 - Andamento dei principali parametri di iniezione acqua di mare, nel periodo da start-up ad Agosto 2008.

Il parametro su cui si agirà è rappresentato dalla portata di acqua di mare reiniettata: il progetto "Angela-Angelina water injection" prevede di arrivare, a regime, ad iniettare 2500 m<sup>3</sup>/g di acqua di mare. Il valore è stato stabilito all'interno dell'attività del Gruppo di Lavoro, a valle dell'esame di modellizzazioni di giacimento che hanno indicato come i pozzi recettori ed in generale la formazione rocciosa presentino caratteristiche tali da assicurare la necessaria iniettività. Inoltre la scelta di pozzi di iniezione localizzati nelle immediate vicinanze della costa permetterà di avere, in caso di esito positivo del progetto, un riscontro facilmente verificabile su quanto il processo di iniezione è in grado di controbilanciare i fenomeni di erosione costiera dovuti ad effetti di subsidenza.

Lo sviluppo progettuale selezionato prevede:

- intervento di conversione dei pozzi da produttori a iniettori di acqua;
- installazione di un sistema di captazione acqua mare denominato R.S.A. (Recupero e Stabilizzazione degli Arenili), basato sullo stesso principio del già descritto BMS; contestualmente agli obiettivi sopra descritti, l'utilizzo di questa modalità di captazione permetterà, auspicabilmente, di stabilizzare il tratto di arenile su cui il sistema R.S.A. verrà installato. Il sito prescelto dovrà quindi essere caratterizzato da un fenomeno erosivo;
- installazione di un sistema di filtrazione acqua di mare;
- installazione di un sistema di additivazione e pompaggio;
- installazione dell'impianto di iniezione in piattaforma;
- posa delle condotte a mare destinate al trasporto dell'acqua di mare dal sito di trattamento al sito finale di iniezione.

L'attività prevede la conversione da produttori di gas ad iniettori dei pozzi ANGELA 2 DIR (che verrà convertito nel pozzo INJ 1) e ANGELA 4 DIR (che verrà convertito nel pozzo INJ 2). Essi sono due dei quattro pozzi esistenti sul cluster Angela (Fig. 5).

Il livello meno profondo si trova a 3065 m di profondità dal piano del fondale; il livello più profondo ed il suo estremo inferiore si trova a 3970 m dal piano del fondale. Dagli studi propedeutici eseguiti risulta la fattibilità tecnica degli interventi.

In particolare, per quanto riguarda Angela 2 Dir, le inflangiate di testa pozzo non sono ritenute idonee ai fini di un loro reimpiego per le fasi di perforazione. Pertanto è necessario procedere alla chiusura mineraria e alla sostituzione di tutta l'inflangiatura. Anche per Angela 4 Dir si dovrà procedere alla sostituzione della testa pozzo, ed al ricompletamento del pozzo.

Per l'approvvigionamento dell'acqua di mare destinata alla reiniezione, visti i risultati ottenuti nella fase sperimentale, è stato concordato, su decisione del Gruppo di Lavoro, di utilizzare il sistema R.S.A. (Recupero e Stabilizzazione Arenili), basato sul medesimo principio del già descritto BMS



Nei mesi di Giugno/Luglio 2006 sono stati eseguiti dei sondaggi preliminari a profondità di 3 m nei seguenti siti, al fine di ricostruire la successione stratigrafica:

- Lido Dante (settore a Sud della foce dei Fiumi Uniti);
- Lido Adriano (settore a Nord della foce dei Fiumi Uniti);
- Lido di Classe (settore a Nord dell'abitato di Lido di Classe).

In base ai risultati delle analisi dei campioni prelevati, è emerso quanto segue:

1. per il sito Lido Adriano non è possibile potenziare il sistema di captazione esistente, dal momento che sia le dimensioni dell'arenile che le caratteristiche del terreno non permettono di arrivare alla captazione del quantitativo di acqua necessario;
2. sia il sito di Lido di Dante che quello di Lido di Classe presentano invece una stratigrafia idonea all'installazione del sistema.

La spiaggia del lido di Dante, in particolare, è caratterizzata da sabbie medie e fini che garantiscono una piena efficacia del sistema di drenaggio, mentre il Lido di Classe, pur presentando sedimenti nel complesso idonei, induce a molte perplessità a causa della sua lontananza dal campo Angela-Angelina e per la sua appartenenza ad un'area di riserva naturalistica.

Sul sito nell'Aprile 2007 è stata effettuata una dettagliata ricostruzione della stratigrafia e della litologia dei sedimenti incontrati a diversa profondità in tutta l'area interessata all'installazione dei componenti del sistema, attraverso l'analisi diretta delle stratigrafie dei sondaggi, prelievo di campioni e analisi in situ.

Sono stati riscontrati valori di permeabilità superficiale  $K$  da  $1.01 \times 10^{-4}$  a  $6.69 \times 10^{-5}$  m/sec, che sono abbastanza tipici delle sabbie fini, mentre i campioni prelevati ed analizzati in laboratorio hanno mostrato valori di  $K = 3.5 \times 10^{-5}$  m/sec per il primo metro di sabbie e di  $K = 2.5 \times 10^{-5}$  m/sec per le sabbie più profonde (secondo metro).

Il tratto di arenile in cui opererà il sistema RSA sarà interessato da un'attività di monitoraggio, svolta dal Consorzio Ferrara Ricerche, attraverso l'installazione di una serie di piezometri posti lungo il percorso delle tubazioni drenanti, che forniranno informazioni sull'andamento del processo di stabilizzazione ed eventuale recupero di spiaggia indotto dal sistema.

La presenza di una serie temporale di rilievi in condizioni "indisturbate" permetterà un'effettiva valutazione delle capacità del sistema di drenaggio.

### **Sistema di filtrazione acqua mare**

L'acqua di mare captata dal sistema RSA, giunta in area pozzo Angelina 1, verrà inviata in ingresso alla unità di filtrazione. Sono stati previsti due stadi: il primo, basato su filtri cosiddetti "autopulenti", consentirà la rimozione del particolato solido contenuto nell'acqua di mare avente dimensione maggiore o uguale a 50 micron. Seguirà un secondo stadio, in cui è previsto l'utilizzo di filtri multi-media, che consentirà una rimozione spinta fino a 5 micron. I filtri saranno rivestiti internamente di materiale non aggredibile dall'acqua di mare, così da evitare fenomeni di corrosione. Saranno inoltre dotati di un sistema di automazione e controllo che opererà le fasi di controlavaggio in base al livello di intasamento dei filtri stessi. Verranno predisposte inoltre a monte e a valle della filtrazione prese campione, per il controllo dell'efficienza del sistema. Tutti i parametri di processo significativi verranno inviati alla centrale di Ravenna Mare per permettere il monitoraggio del sistema da parte del personale Eni. La filtrazione e la sua efficienza sono di fondamentale importanza per assicurare che il processo di iniezione in pozzo possa aver luogo in modo efficace e continuativo; la rimozione delle particelle in sospensione evita infatti che i pori della roccia costituente il *reservoir* di iniezione si ostruiscano e la permeabilità dei pozzi diminuisca drasticamente.

Come nel caso del sistema BMS sperimentale, anche per il sistema di captazione attuale valgono le stesse considerazioni, per cui, essendo la portata di acqua captata dipendente dalle condizioni meteorologiche, è stato previsto di stendere in area pozzo Angelina 1 una condotta che ricircolerà a mare l'eccesso di acqua captata.

Una volta filtrata, l'acqua verrà inviata, tramite una condotta in vetroresina DN 6" esistente, alla vicina centrale di Ravenna Mare, che dista circa 1500 m dall'area pozzo Angelina 1.

Giunta in centrale entrerà in un serbatoio atmosferico in vetroresina, che verrà mantenuto sempre in riempimento per evitare che condizioni eccezionalmente sfavorevoli alla captazione, che nemmeno la condotta in vetroresina interrata sotto il piano spiaggia sia in grado di compensare, causando l'interruzione del processo di iniezione. A valle del serbatoio l'acqua sarà inviata ad un miscelatore statico dal quale l'acqua viene inviata a due stadi di pompaggio in serie: il primo porta la pressione dell'acqua da valore atmosferico a 5 bar, il secondo consente di arrivare a 80 bar, valore a cui l'acqua viene introdotta nel sealine da 10" che la porta sulla piattaforma Angela-Angelina.

Per ciascuno dei due stadi di pompaggio sono previste 3 pompe, operanti in parallelo, ciascuna avente capacità pari al 33% della portata da iniettare (105 m<sup>3</sup>/h).

Dopo la filtrazione, l'acqua entra nell'unità di pompaggio, che consentirà di portare il valore della pressione a 200 bar, che rappresenta la pressione di iniezione. Ciascuna delle 3 pompe avrà una capacità pari al 30% della portata totale di iniezione (pari a 105 m<sup>3</sup>/h). Questo per consentire di massimizzare la flessibilità delle operazioni di iniezione. L'acqua, ormai nelle condizioni idonee all'immissione in unità geologica profonda, viene inviata tramite un sealine da 6" al cluster Angela, struttura *offshore* ubicata a circa 400 m dalla piattaforma Angela-Angelina, dove ha luogo il processo di iniezione attraverso i pozzi. Per il trasporto dell'acqua mare dalla piattaforma Angela-Angelina al cluster Angela, verranno posate due linee, diametro 6". Saranno del tutto analoghe, anche se una verrà utilizzata preferenzialmente per le eventuali operazioni di acidificazione che si dovessero rendere necessarie sui pozzi iniettori, mentre la seconda verrà utilizzata per il trasporto del fluido iniettato.

## Conclusioni

Questa memoria illustra gli obiettivi e i primi risultati sperimentali ottenuti nell'ambito di un progetto sperimentale di ricerca per il controllo della subsidenza costiera. Il progetto rappresenta un caso "unico" al mondo di stabilizzazione dei cedimenti innescati dalla subsidenza costiera di origine antropica. L'iniezione di acque nel pozzo a terra Angelina 1 consente di controllare e mantenere la pressione degli acquiferi di livelli produttivi del giacimento di gas ubicato a largo di Lido di Dante (Ravenna). L'iniziativa intrapresa attraverso il protocollo di Intesa tra Comune di Ravenna, Provincia di Ravenna, Regione Emilia Romagna ed Eni S.p.A. sta consentendo lo sfruttamento dei giacimenti di gas naturale, una delle risorse di maggiore rilevanza del territorio Ravennate, minimizzando gli effetti di subsidenza innescati dalla estrazione attraverso l'utilizzazione delle migliori tecnologie disponibili e di scelte gestionali ispirate a modelli di sviluppo sostenibile.

I risultati confortanti ottenuti dal Progetto "Angela-Angelina pressure maintenance" (incremento delle pressioni di 25 bar causati dall'attività di iniezione d'acqua) hanno consentito di rinnovare il Protocollo di Intesa, con l'intento di incrementare le portate d'acqua da iniettare nei pozzi localizzati nel campo di Angela-Angelina, a largo di Lido Adriano (Ravenna). Il progetto "Angela-Angelina water injection", attualmente in corso, prevede un incremento della portata iniettata fino a 2500 m<sup>3</sup>/giorno e prevede l'utilizzo dell'acqua di mare filtrata da un sistema di drenaggio della spiaggia (RSA) che verrà installato sull'arenile compreso tra la foce dei Fiumi Uniti e il Lido di Dante (Ravenna).

## Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano tutti i componenti del gruppo di lavoro costituitosi con il Protocollo di Intesa tra Comune di Ravenna, Provincia di Ravenna, Regione Emilia Romagna ed Eni S.p.A. In particolare si ringraziano: il prof. Paolo Colantoni (Università di Urbino - Eni E&P); Dott. Giuseppe Bortone, Dott. Raffaele Pignone e Dott.ssa Luisa Perini (Regione Emilia-Romagna); Dott. Stenio Naldi (Provincia di Ravenna); Dott.ssa Angela Vistoli (Comune di Ravenna); Ing. Enrico Tavolini, Dott. Walter Rizzi, Ing. Luigi Terzi (Eni E&P).

**Bibliografia**

- AA. VV. (2005) - *Multi-disciplinary assessment of subsidence phenomena in the Ravenna area*. Land Subsidence Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Simp. on Land Subsidence, Shanghai, Cina, Ottobre 2005.
- AA. VV. (2006) - *Lo stato dei litorali italiani*. In "Studi Costieri", vol. 10, Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero.
- Barends B.J., Steedman R., De Groot M.B., Knoeff H.G. e Bijker R. (2005b) - *Environmental effects of land subsidence induced by gas withdrawal along the Ravenna coast - Part II : environmental impact*. Land Subsidence Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Simp. on Land Subsidence, Shanghai, Cina, Ottobre 2005.
- Barends B.J., Steedman R., Schroot B.M. (2005a) - *Environmental effects of land subsidence induced by gas withdrawal along the Ravenna coast - Part I : available information*. Land Subsidence Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Simp. on Land Subsidence, Shanghai, Cina, Ottobre 2005.
- Billi P., Ciavola P., Boettger C., Salemi E. e Preciso E. (2007) - *Trasporto solido dei Fiumi Uniti e dinamica della zona di foce*. In: Terzo Forum Internazionale "Pianificazione e Tutela del Territorio costiero, questioni, metodi, esperienze a confronto", Vol. 127: 333-361. Maggioli Editore. ISBN: 978-88-387-3482-8.
- Ciavola P., Vicinanza D., Fontana E. (2008) - *Beach drainage as a form of shoreline stabilization: case studies in Italy*. 31<sup>st</sup> International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, Germany (in stampa).
- Gambolati G. e Teatini P. (1998) - *Numerical analysis of land subsidence due to natural compaction of the Upper Adriatic Sea Basin, in CENAS*. G. Gambolati ed., Kluwer Ac. Pub., pp. 103-132.
- Houtenbos A.P.E.M., Houtjet M.W.A. e Barends B.J. (2005) - *Subsidence from geodetic measurements in the Ravenna area*. Land Subsidence Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Simp. on Land Subsidence, Shanghai, Cina, Ottobre 2005.
- Polo P. (2002) - *Studio specialistico al fine di valutare l'inondabilità del territorio ravennate*. Rapporto dal Contratto tra MEDingegneria e comune di Ravenna.
- Salvioni G. (1957) - *I movimenti del suolo nell'Italia cento-settentrionale*. Boll. Geodesia e Scienze Affini, XVI, 3.
- Schroot B.M., Fokker P.A., Lutger J.E., Van der Meer B.G.H., Orlic B. e Scheffers B.C. (2005) - *Land subsidence induced by gas production: an integrated approach*. Land Subsidence Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Simp. on Land Subsidence, Shanghai, Cina, Ottobre 2005.
- Teatini P., Ferronato M., Gambolati G., Bertoni W. e Gonella M. (2005) - *A century of land subsidence in Ravenna, Italy*. Environ. Geol. 47: 831-846.

**Manoscritto ricevuto il 5/10/2008, accettato il 5/11/2008.**

## 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.

**Keywords** - 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 €26,00 +IVA per pagina pubblicata sulla Rivista in bianco/nero. 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 2001618  
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



Finito di stampare  
nel mese di gennaio 2009  
Nuova Grafica Fiorentina