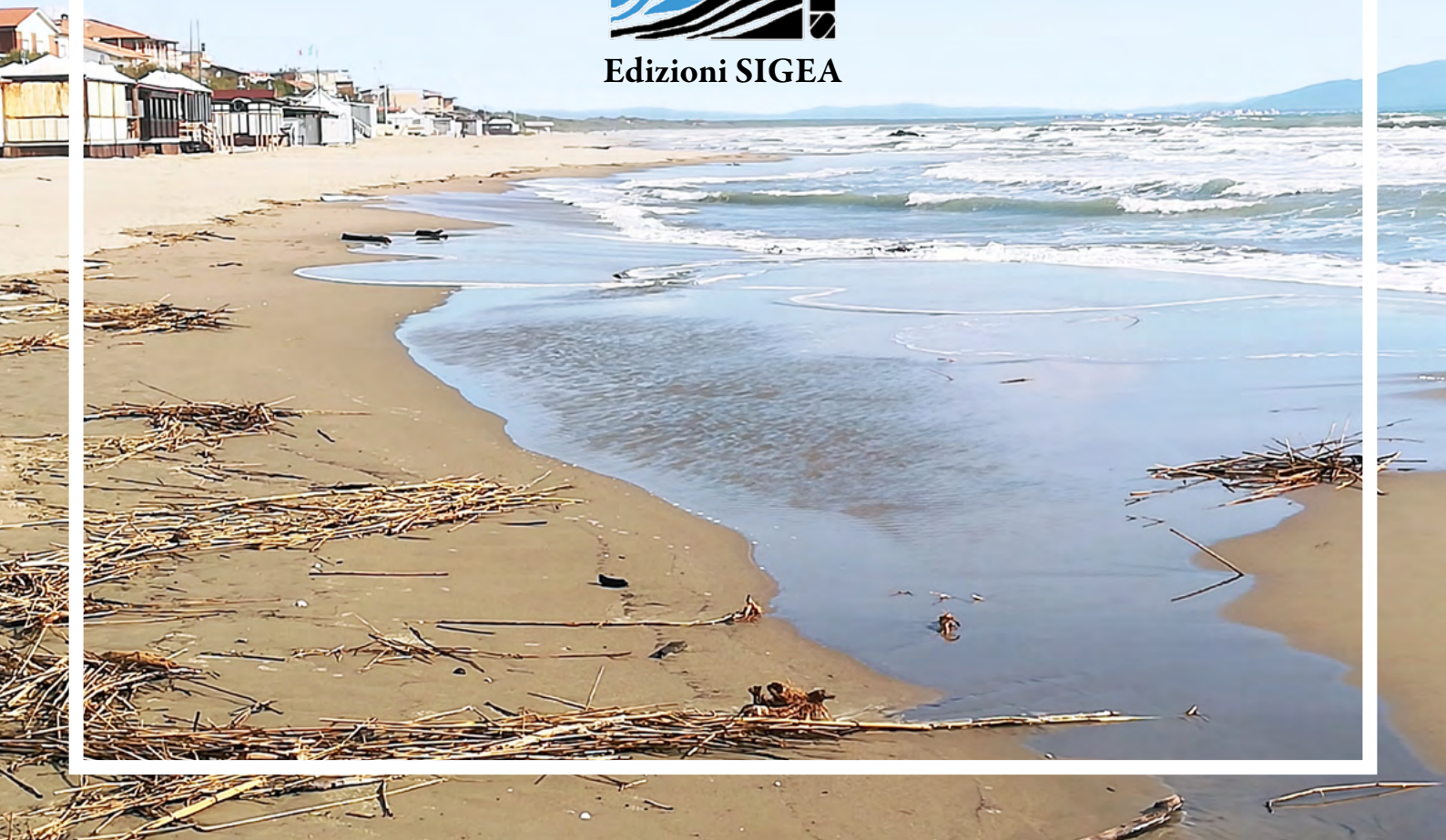
Monografie di Geologia Ambientale

LE COSTE

caratteristiche, tendenze evolutive, erosione e interventi di difesa

A cura di
Francesco Stragapede



Edizioni SIGEA

SPERI SOCIETÀ DI INGEGNERIA E DI ARCHITETTURA SPA

Una moderna società di ingegneria che porta a patrimonio fondamentale del proprio operato la conoscenza del contesto geologico e ambientale del territorio su cui interviene. Oltre 350 ruoli tecnici distribuiti su 8 sedi nazionali tra i quali oltre 25 tra geologi e ingegneri ambientali in costante crescita in numero e competenza. Partecipazione attiva nelle Associazioni Scientifiche e promozione della Ricerca e Sviluppo applicata all'ingegneria.

G.A.T. Dipartimento Geologia Ambiente e Territorio

SPERI
TOGETHER. TOMORROW.

SIGEA • Monografie di Geologia Ambientale

Monografie di Geologia Ambientale

LE COSTE

caratteristiche, tendenze evolutive, erosione e interventi di difesa

A cura di
Francesco Stragapede

Edizioni SIGEA

Con il patrocinio di

CONSIGLIO NAZIONALE
DEI GEOLOGI

Monografie di Geologia Ambientale

Comitato scientifico
Stefano Albanese, Valeria Ancona, Anna Barra Caracciolo, Eleonora Beccaloni, Vincenzo Belgiorno, Piero Bellotti, Mario Bentivenga, Giovanni Beretta, Aldino Bondesan, Francesca Bozzano, Alessandro Bratti, Vito Bruno, Nicola Casagli, Sergio Castenetto, Rachele Castro, Giorgio Cesari, Vera Corbelli, Erasmo D'Angelis, Donatella De Rita, Rosa Maria Di Maggio, Massimiliano Fazzini, Maria Dolores Fidelibus, Fabio Garbin, Francesco De Pascale, Giuseppe Gisotti, Fabrizio Gizzi, Maurizio Guerra, Massimiliano Lega, Fabio Luino, Sergio Madonna, Carlo Manzo, Luciano Masciocco, Davide Mastroianni, Giuseppe Mastronuzzi, Federica Paglietti, Mario Parise, Fabio Pascarella, Cinzia Pasquale, Laura Passatore, Raffaele Persico, Marco Petitta, Marco Petrangeli Papini, Gianluca Pirani, Francesco Pirozzi, Sabina Porfido, Enzo Pranzini, Elisabetta Preziosi, Antonio Rusconi, Fabio Sabetta, Gabriele Scarascia Mugnozza, Andrea Sconocchia, Paolo Sconocchia, Gianluca Selicato, Silvia Serranti, Rajanandrea Sethi, Andrea Sonnino, Giuseppe Spilotro, Fabio Trincardi, Maria Cristina Tullio, Vito Felice Uricchio, Giuseppe Vadalà, Gianluca Valensise, Igor Villani, Patrizio Zucca

Comitato editoriale
Silvano Agostini, Gigliola Alessandroni, Daniele Baldi, Andro Barabesi, Francesco Cancellieri, Lella Checchi, Eugenio Di Loreto, Maria Di Nezza, Daria Durante, Ilaria Falconi, Cesare Ferone, Adele Garzarella, Enrico Gennari, Giammarco Guidetti, Alessio Iacobini, Gianluca Lattanzi, Michele Macaluso, Carlo Malgarotto, Endro Martini, Fabio Oliva, Michele Orifici, Gaetano Osso, Vincent Ottaviani, Guido Pagliaga, Silvia Paparella, Aldo Papotto, Edoardo Robortella Stacul, Orietta Sala, Gaetano Sammartino, Paolo Sassone, Stefano Sorvino, Nino Tarantino, Salvatore Valletta, Pietro Zangheri

Direttore scientifico
Vito Felice Uricchio

Direttore editoriale
Antonello Fiore

Progetto grafico e impaginazione
Pino Zarbo - Fralerighe Book Farm
www.fralerighe.it

ISBN 979-12-80811-04-2
© copyright 2023 Edizioni SIGEA
E-mail: monografie@sigeaweb.it
Sito web: www.sigeaweb.it

In copertina: Spiaggia di Levante di Castiglione della Pescaia (GR) - Ph Francesco Stragapede

Finito di stampare nel mese di novembre 2023 dalla Industria grafica Sagraf Srl, Capurso (BA)

Tutti i diritti sono riservati a norma di legge e a norma delle convenzioni internazionali.

Indice

Presentazione
Francesco Stragapede 7

Caratteristiche e tendenze evolutive della costa marchigiana
Alessio Acciarri, Carlo Bisci, Gino Cantalamessa, Sergio Cappucci, Federico Spagnoli, Emiliana Valentini 11

Risposta del litorale delle Marche meridionali alla costruzione di opere di difesa
Matteo Beleggia 21

Caratteri ambientali ed evoluzione recente del sito protetto della Palude di Torre Flavia (Lazio settentrionale)
Piero Bellotti 37

Evoluzione storica e recente delle coste della Regione Marche (Italia centrale adriatica)
Carlo Bisci, Gino Cantalamessa, Federico Spagnoli, Mario Tramontana 48

Ingegneria Naturalistica per la tutela delle spiagge emerse e sommerse. Un approccio ecologico
Federico Boccalaro 56

Erosione e cementificazione costiera: la situazione in Italia con particolare riferimento alla Basilicata (Italia)
Marta Izzo 69

Variazioni della linea di costa lungo la Catena Costiera calabrese negli ultimi 500 anni dai dati storico-cartografici e geomorfologici
Gaetano Osso 71

Incidenze geologiche e geotecniche sulla evoluzione e/o la scomparsa di siti archeologici in area costiera e i relativi impatti dovuti alla risalita del livello del mare
Rosa Pagliarulo 86

Le attività di gestione del rischio costiero nel Comune di Genova. Sostenibilità nella gestione della fascia costiera
Luigi Perasso 94

Cartografia storica e analisi digitale per le dinamiche costiere e opere di bonifica attorno all'antico lago Prile
Leonardo Porcelloni 101

Il ripascimento delle spiagge turistiche
Enzo Pranzini 106

L'erosione e la difesa sostenibile del litorale toscano
Enzo Pranzini 111

Erosione costiera - Considerazioni su una pocket beach nel Golfo di Cagliari - Genna 'e Mari
Andrea Serreli 118

Monitoraggio dell'erosione costiera in Emilia-Romagna. Metodi, strumenti, banche dati e Strategia GIDAC
Flavia Sistilli, Lorenzo Calabrese, Nunzio De Nigris, Jessica Lelli, Roberto Montanari, Maurizio Morelli, Luisa Perini 130

Le problematiche della rada di Alghero, paradigma dell'assetto costiero in Sardegna
Giovanni Tilocca 148

Panorama sul delta del Fiume Tevere: processi attuali ed evoluzione tardo quaternaria
Paolo Tortora 168

L'erosione costiera nel Cilento meridionale (Campania, Italia): criticità e ipotesi di interventi
Alessio Valente 190

I Geositi costieri marchigiani, grande opportunità e grande vulnerabilità: una proposta per la valorizzazione e la promozione del Patrimonio Geologico
Laura Valentini 200

Il contributo di un nuovo convertitore dell'energia del mare alla protezione delle coste ed alla produzione di energia pulita
Pierfranco Ventura, Manlio Palmarocchi, Claudio Domeniconi 212

Presentazione

Si raccolgono in questo volume alcuni degli interventi dei Webinar promossi nel 2021 e 2022 su "Le coste: caratteristiche, tendenze evolutive , erosione ed interventi di difesa" e di eventi correlati svolti nel Lazio e nella Toscana, percorso virtuale lungo alcuni tratti delle coste italiane in cui si è parlato di erosione costiera, trasporto solido, correnti marine, subsidenza, cambiamenti climatici, rischio, pianificazione, ripascimenti ed interventi di difesa, e dove i numerosi relatori hanno condiviso studi, indagini e progetti con tutti i partecipanti, cercando di far comprendere quelle dinamiche che hanno permesso la formazione delle nostre coste e che ora ne governano i cambiamenti, ne condizionano l'evoluzione e ne determinano l'accrescimento o la riduzione.

Queste dinamiche, che abbiamo imparato a riconoscere attraverso eventi estremi sempre più frequenti, che occupano sempre più spesso le pagine dei nostri quotidiani e trovano sempre più posto nei servizi giornalistici televisivi, ormai si manifestano con eventi impetuosi e rapidi, ad andamento catastrofico, chiari effetti del generale dissesto idrogeologico che interessa il nostro territorio, dove interagiscono con l'uomo, con le infrastrutture, l'urbanizzato e le risorse turistiche ed economiche, richiamano l'attenzione e la preoccupazione dei cittadini, delle istituzioni e dei tecnici.

La conoscenza di questi fenomeni evolutivi e di modificazione, che incidono pesantemente sullo sviluppo urbanistico, sulla efficienza delle infrastrutture e sull'economica delle aree costiere e sull'attività turistica, costituisce il primo passo per attuare opere di difesa efficienti e rispettose del contesto ambientale in cui vengono inserite, attente a non delocalizzare le criticità e progettate armoniosamente con il contesto ambientale, nel senso più ampio, e con il paesaggio.

Le coste costituiscono per l'Italia un elemento geografico che margina oltre km 8300 di territorio, definendo idealmente il limite tra terra e mare, un limite estremamente dinamico, soggetto a modificazioni nel tempo e nello spazio, in cui i fattori di erosione, trasporto, subsidenza sono conseguenza delle dinamiche fluviali, dell'azione delle mareggiate e degli eventi alluvionali, e delle attività, delle azioni e delle pressioni antropiche, permanenti e stagionali, operate lungo le coste urbanizzate o quelle a prevalente vocazione turistica.

La marcata variabilità geomorfologica della linea di costa produce effetti sempre più determinanti sulle economie locali, coinvolte sia nelle aree agricole che in quelle urbanizzate, da effetti di sedimentazione indesiderata, che condizionano i deflussi fluviali verso il mare aperto o limitano la fruibilità delle aree portuali, o da effetti di arretramento per erosione, che determinano instabilità e danneggiamento di porzioni di aree urbane, infrastrutture e impianti di fruizione delle aree costiere.

Ai fattori morfo-dinamici ordinariamente noti si aggiungono quelli derivanti dai mutamenti climatici in atto, in cui gli eventi meteo estremi più frequenti producono mutamenti del territorio più incisivi e rapidi di quelli che siamo abituati a contrastare; l'azione antropica di controllo delle coste risulta sempre più difficile, inefficace per lo più, con conseguenze sempre meno valutabili anche nel medio termine, condizione che richiede un rapido sviluppo di modelli previsionali che non possono prescindere da programmi di monitoraggio più attenti e diffusi lungo le nostre coste.

Lo studio dell'evoluzione costiera, per tutte le nostre regioni rivierasche e per l'economia del nostro intero Paese, costituisce pertanto un elemento fondante alla pianificazione, programmazione, progettazione ed attuazione di interventi efficaci a tutelare la costa, le aree protette sottese, la loro biodiversità e gli ambienti che ne qualificano i diversi tratti, oltre il valore storico, turistico ed economico che rappresenta questo intangibile limite dove "*... è scritta la storia della vita che si rinnova di continuo, con le onde che cancellano le impronte sulla sabbia oppure vi lasciano nuovi oggetti venuti da chissà dove ...*" (Romano Battaglia).

La pubblicazione di questi contributi costituisce qui un tentativo, tra i molti in atto, di diffondere la conoscenza delle peculiarità e delle problematiche delle nostre coste, attraverso l'impegno sinergico di esponenti della comunità scientifica, di professionisti del settore e di figure istituzionali governative di condividere le scelte di pianificazione sino ad oggi attuate, descrivere agli addetti ai lavori ed agli appassionati gli strumenti disponibili per il monitoraggio delle coste e, dove è stato possibile, illustrare gli effetti delle azioni promosse per il controllo dell'erosione e la valorizzazione delle coste e delle opere di difesa, nelle sue differenti tipologie.

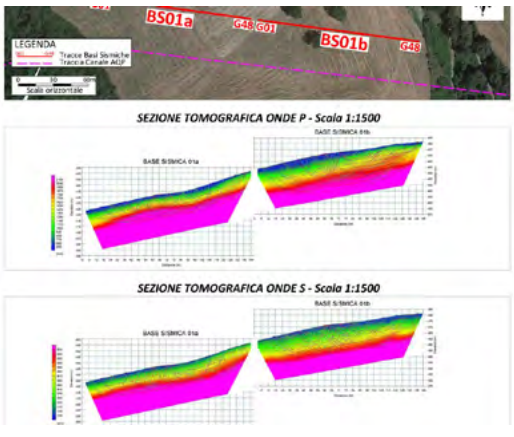
Augurandovi quindi una buona lettura, spero che questo volume riesca a promuovere in voi tutti la capacità di "*leggere*" con occhi diversi quelle spiagge che nella prossima estate saranno ospiti delle vostre vacanze, permettendovi di valorizzarne al meglio ogni singolo aspetto di quei luoghi, nel rispetto del territorio, dell'ambiente e della biodiversità che rende unico ogni tratto delle nostre coste.

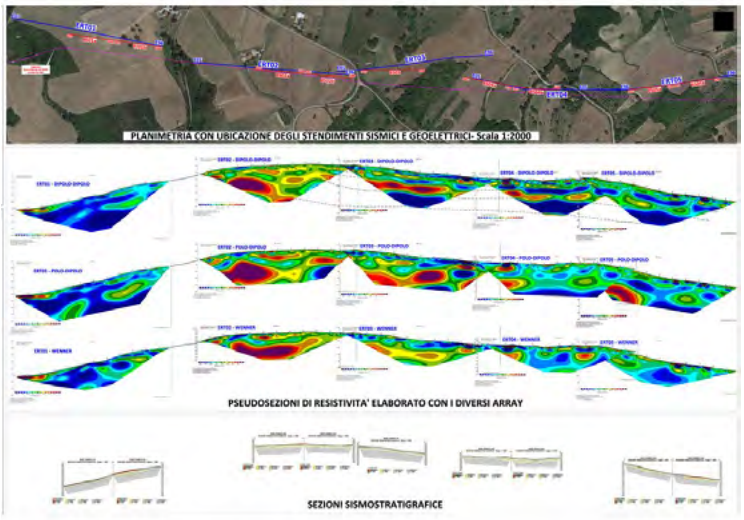
Francesco Stragapede

ApoGeo

- GEOLOGIA
- GEOFISICA
- TOPOGRAFIA
- TEMPORARY MANAGEMENT

WWW.APOGEO.BIZ





Monitoraggio costiero

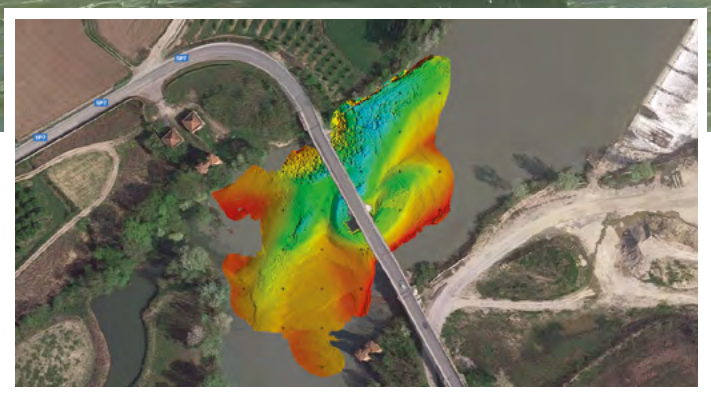


Immagine: MTS Engineering

Strumenti ad alta tecnologia anche a noleggio per:

Studio dei fondali e delle coste
Multibeam, SSS, SBP, droni marini …

Studio del sottosuolo
Georadar, sismica, geoelettrica, inclinometri …

Monitoraggio sismico
Sismometri, strong motion, reti early warning …

Monitoraggio ambientale
Magnetometri, sonde oceanografiche …

Posizionamento di precisione e navigazione
GNSS, piattaforme inerziali, USBL …

3D imaging
Rilievi terrestri, sotterranei, costieri, subacquei anche integrati, anche in dinamico …

Seleziona il link!

CK-14

CODEVINTEC

Tecnologie per le Scienze della Terra e del Mare

tel. +39 02 4830.2175 | info@codevintec.it | www.codevintec.it

Via Bulgarini 125, 00019 Tivoli (Roma)
+39 340 5236660
info@fralerighe.it
www.fralerighe.it

FRALERIGHE BOOK FARM

EDITORIA | WEB | MULTIMEDIA

Fralerighe Book Farm è un service editoriale che mette competenza e professionalità al servizio di chi pubblica e scrive. Per gli editori e per gli autori, **Fralerighe Book Farm** è specializzato nella cura redazionale dei testi, con l'obiettivo di mettere la tecnologia a disposizione del libro, seguendo tutta la filiera di lavorazione testuale e grafica della stampa e del digitale sfruttando al meglio le potenzialità di ciascun supporto, dall'editing all'impaginazione, senza tralasciare la correzione di bozze e la traduzione.

La **redazione** e l'**ufficio grafico** offrono i seguenti servizi sia per volumi sia per riviste:

- Progettazione e impaginazione di libri, riviste, cataloghi di qualsiasi formato e tipologia. Servizi per le case editrici, definizione linea editoriale, estensioni multimediali di libri cartacei, ideazione e impostazione grafica, redazione dei contenuti
- Realizzazione ebook professionali pronti per essere pubblicati, acquistati e letti
- Web design, sviluppo siti internet, portali, blog, e-commerce
- Creazione di logo/branding, corporate identity, restyling di loghi e siti internet, creazione di layout landing page
- Soluzioni web, consulenza tecnica, gestione dominio
- Creazione e gestione di newsletter
- Ideazione e realizzazione di campagne promozionali, email marketing, bannering, brochure, flyers, spot pubblicitari
- Comunicazione digitale e Social Media Strategy per la creazione, la crescita e la cura della community e del pubblico di riferimento dell'azienda
- Servizi SEO, posizionamento nei motori di ricerca

FRALERIGHE EDIZIONI

"LA MACCHINA TECNOLOGICAMENTE PIÙ EFFICIENTE CHE L'UOMO ABBIA MAI INVENTATO È IL LIBRO" [NORTHROP FRYE]

Fralerighe Edizioni è una casa editrice indipendente, interculturale e sociale che vuole essere laboratorio di incontri e di sperimentazione per contribuire alla costruzione di una società plurale equa e positiva. Nasce valorizzando le nuove forme di pubblicazione tra la carta e il digitale, dal libro tradizionale a quello formativo denominato mediabook. La linea editoriale è caratterizzata da argomenti di rilevanza sociale attraverso le collane dedicate:

- Fralerighe eBook
- GiraMondo
- LabCult
- Luoghi Tradizioni Relazioni
- MeltingPot
- Poesia
- Narrativa
- Teatro
- Guide Geoarcheologiche d'Italia

Caratteristiche e tendenze evolutive della costa marchigiana

Characteristics and evolutionary trends of the Marche coastline

Alessio Acciarri[1], Carlo Bisci[1], Gino Cantalamessa[1], Sergio Cappucci[2], Federico Spagnoli[1,3], Emiliana Valentini[4]

[1] Università di Camerino, Scuola di Scienze e Tecnologie, Sezione di Geologia, Camerino
[2] ENEA, Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali, Roma
[3] IRBIM-CNR, Ancona
[4] ISP-CNR, Montelibretti (Roma)

E-mail: sergio.cappucci@enea.it (S. Cappucci), carlo.bisci@unicam.it (C. Bisci)

Parole chiave: dune costiere, habitat naturali, gestione e conservazione del territorio, banche dati, GIS, DSAS
Key words: coastal dunes, natural habitat, land conservation and management, databases, GIS, DSAS

RIASSUNTO

L'erosione costiera è una delle principali conseguenze dei cambiamenti climatici e degli impatti antropici che stanno sempre più danneggiando le infrastrutture, gli habitat e l'economia delle comunità costiere. Nella Regione Marche, più che in altri territori italiani, le misure di mitigazione ed adattamento adottate sono consistite principalmente nella realizzazione di opere di difesa rigide (scogliere e pennelli) e, secondariamente, interventi di ripascimento degli arenili con sabbie e ghiaie. In questo lavoro vengono descritte le principali caratteristiche dei litorali marchigiani ed i fattori che ne hanno condizionato l'evoluzione Particolare attenzione è riservata al caso studio della riserva naturale della Sentina (San Benedetto del Tronto, Marche meridionale). Quest'ultima viene riportata come esempio virtuoso per l'analisi territoriale e nuovi modelli di pianificazione e programmazione degli interventi basati su risultati della ricerca scientifica.

ABSTRACT

Coastal erosion is one of the main consequences of climate change and human impacts that are increasingly damaging the infrastructure, habitats and economy of coastal communities. In the Marche Region, more than in other Italian territories, the mitigation and adaptation measures adopted have involved the construction of hard defense structures (barriers and groins) and, secondarily, beach nourishment with sand and gravel. This work describes the main characteristics of the Marche Region's beaches, the factors that have conditioned their evolution and a particular case study: the Sentina Nature Reserve. This coastal area is described as a virtuous example for territorial analysis and new models for intervention planning based on scientific outcomes.

INTRODUZIONE

In natura, è normale avere accumuli di sedimenti fini alle spalle di spiagge in progradazione stabili o in lenta erosione. Questi corpi sedimentari, che costituiscono le dune costiere, oltre ad avere una grande rilevanza dal punto di vista ecologico e ambientale, costituiscono anche un elemento fondamentale per la protezione dall'azione del moto ondoso delle zone retrostanti e contribuisce significativamente a ridurre il rischio connesso con la risalita del cuneo salino nelle falde di acqua dolce circalitorali.

Le dune costiere derivano principalmente dall'accumulo di materiale clastico proveniente dalla spiaggia emersa, abbastanza fine da poter essere trasportato dal vento che va a rideporlo in corrispondenza di ostacoli naturali (vegetazione, massi o detriti vari spiaggiati dal moto ondoso) o artificiali (staccionate, muri, rilevati stradali, massicciate ecc.), dove viene fissato dalla vegetazione.

Quest'ultima è molto differenziata, anche su brevissime distanze, in funzione della posizione rispetto alla duna ed è indicativa dello stato di conservazione dell'intero corpo sedimentario.

Dal punto di vista botanico-vegetazionale, in condizioni ideali (ovvero in totale assenza di particolari fenomeni di disturbo antropico), il sistema dunale può essere schematizzato come segue, procedendo dalla costa verso l'interno (Biondi, 1999; Géhu e Biondi, 1994; 1996):

- zona afitoica (priva di comunità vegetali);
- comunità effimere e pioniere a *Cakile maritima* Scop. e *Salsola kali* L., prossime alla linea di costa;
- comunità perenni delle dune embrionali con *Echinophora spinosa* L. e *Thinopyrum junceum* (L.) Á. Löve (syn: *Agropyron junceum* (L.) P. Beauv.);
- comunità di duna mobile a *Calamagrostis arenaria* (L.) *Roth subsp. arundinacea* (Husn.) Banfi, Galasso e Bartolucci (syn: *Ammophila arenaria* (L.) Link), specie nota per la sua azione consolidatrice delle dune;
- duna fissa;
- retroduna.

Purtroppo, in conseguenza dell'attività antropica lungo le spiagge e nei bacini idrografici a monte, nell'ultimo secolo e mezzo circa, le dune costiere che bordavano la grande maggioranza dei litorali marchigiani sono state distrutte o, quantomeno, fortemente alterate. Tra i pochi lembi rimanenti, di particolare rilevanza sono quelli presenti all'estremo meridionale della regione Marche, lungo la costa di competenza della Riserva Naturale Regionale della Sentina.

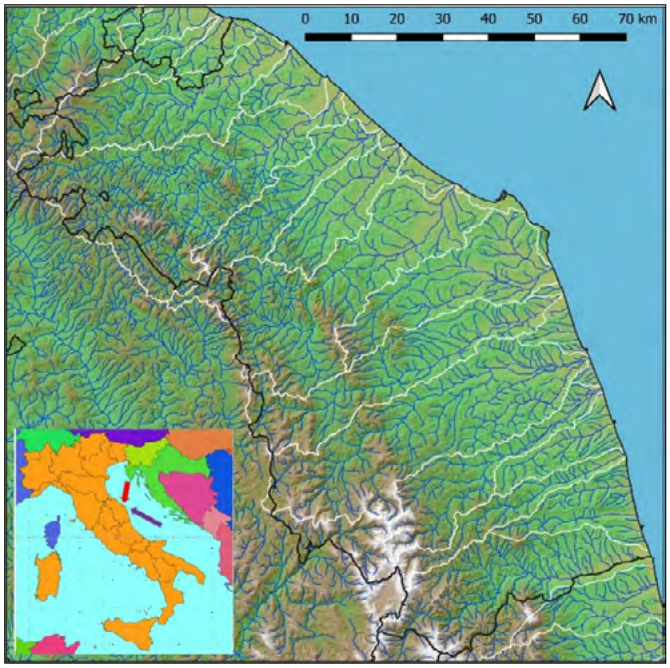


Figura 1. Regione Marche e reticolo fluviale.

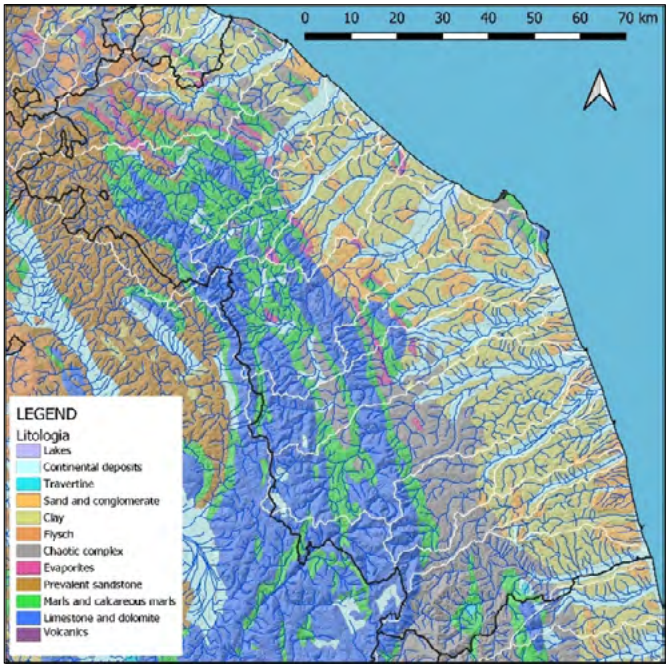


Figura 2. Carta litologica della Regione Marche.

L'AREA DI STUDIO
I LITORALI DELLA REGIONE MARCHE

Il litorale marchigiano (Italia centrale adriatica) si estende per circa 172 km, di cui circa 150 di coste basse, sabbiose e/o ghiaiose (Fig. 1). Nel suo ambito si possono riconoscere tre settori morfodinamici principali:

- Le coste prevalentemente basse - con l'eccezione delle falesie del Monte San Bartolo, nel Pesarese – che si estendono per circa 97 km a nord del porto di Ancona con esposizione verso NE;
- Le falesie, che spesso presentano *pocket beaches* alla loro base e si estendono per circa 19 km lungo il promontorio del Monte Conero, nella porzione centrale della Regione;
- Le spiagge orientate all'incirca verso ENE della costa "Picena", che occupano circa 56 km nella porzione meridionale delle Marche.

In tutti i tre settori, il mare dominante (ovvero la direzione da cui provengono più frequentemente le mareggiate) è da SE, alimentato dai venti di Scirocco che sono anche quelli che mostrano il massimo *fetch*, ovvero la maggiore estensione di mare antistante, mentre il mare regnante (ovvero la direzione da cui provengono le mareggiate più intense) è quello da N - NNE, alimentato da venti di Bora che, pur avendo un fetch abbastanza ridotto, sono caratterizzati da velocità decisamente elevate (AQUATER, 1982; APAT, 2004; Dramis *et al.*, 2011; Bisci *et al.*, 2021b). Le onde solo raramente raggiungono altezze intorno ai 5 m (0.02% degli eventi).

Mentre lungo il Promontorio del Conero e la falesia del San Bartolo le spiagge sono alimentate dai detriti derivanti dall'instabilità delle falesie retrostanti e dall'erosione dei promontori minori in cui si articola il rilievo, nel resto della regione il ripascimento naturale delle coste, e quindi il loro trend evolutivo, dipende solamente dall'apporto solido operato dai fiumi marchigiani. Il trasporto lungo riva dei sedimenti avviene prevalentemente da sud verso nord e si inverte solo durante le meno frequenti mareggiate da Bora (APAT, 2004; Dramis *et al.*, 2011; Bisci *et al.*, 2021b).

Il reticolo idrografico rilevante ai fini della dinamica costiera regionale è caratterizzato da bacini piuttosto allungati con andamento medio che quasi sempre pressoché ortogonale alla linea di riva e hanno un regime tipicamente torrentizio, con regimi di magra molto scarsi in conseguenze del clima mediterraneo che caratterizza buona parte della regione, con esclusione dei rilievi appenninici. Tutti i corsi d'acqua principali si originano lungo i rilievi carbonatici della dorsale appenninica, che costituiscono il principale acquifero della zona, per poi attraversare l'ampia fascia collinare modellata sui più recenti (soprattutto Pliocene e Pleistocene) termini terrigeni del Bacino Marchigiano Esterno (Fig. 2). Questi ultimi, essendo in prevalenza formati da clasti molto fini, non contribuiscono efficacemente al ripascimento naturale delle spiagge (Bisci *et al.*, 1992; Bisci *et al.*, 2021b).

EVOLUZIONE DEI LITORALI MARCHIGIANI

L'evoluzione naturale di una linea di costa dipende fondamentalmente, oltre che eventuali dislocazioni tettoniche, dall'apporto solido dei fiumi e dalle variazioni del livello del mare. Entrambe questi fattori, alle nostre latitudini, sono strettamente connessi con i cambiamenti climatici, dato che le fasi fredde, comportano tanto un abbassamento del livello del mare in conseguenza delle masse di ghiaccio immagazzinate sui continenti, quanto un aumento della produzione di detriti lungo i versanti spogliati dalla vegetazione (condizioni di resistasia), mentre, durante le fasi calde, lo scioglimento dei ghiacci porta al sollevamento del livello del mare e a una maggiore protezione dei versanti da parte della vegetazione con conseguente minor apporto solido alle foci fluviali (biostasia). A partire dalla tarda età del bronzo, però, l'attività antropica, in qualche modo connessa con l'andamento del clima, almeno fino a circa un secolo e mezzo fa, ha pesantemente alterato questi trend evolutivi fino a invertirli, diventando il principale agente morfogenetico, come è avvenuto negli ultimi due millenni nell'area di studio (Pranzini, 1994; 1995; Bisci *et al.*, 2021c).

EVOLUZIONE STORICA DEI LITORALI MARCHIGIANI

In conseguenza delle fasi tettoniche che hanno portato all'emersione della catena appenninica, la linea di costa della zona in esame è lentamente avanzata verso NE, mostrando fasi alterne di progradazione e arretramento e cambi di velocità di evoluzione in conseguenza dell'alternarsi di fasi climatiche differenti.

Durante l'ultima fase fredda (massimo del Würm circa 20000 anni B.P.) il livello del Mare Adriatico era circa 120 m al di sotto dell'attuale e tutti i fiumi marchigiani drenanti verso est erano quindi affluenti di destra del Po, che aveva il suo delta pochi chilometri a SSE del limite meridionale della regione, all'incirca al largo di Pescara (Storms *et al*., 2008;). La grande produzione di detriti lungo i versanti causava il loro accumulo lungo i fondivalle, dove la velocità di flusso delle acque diminuiva bruscamente e la permeabilità del substrato aumentava, colmando le valli precedenti con ampi e spessi materassi alluvionali aventi superfici suborizzontali (Bisci e Dramis, 1991; Coltorti, 1991; ; Coltorti, 1997; Coltorti e Farabollini, 2008; Acciarri *et al*., 2016; Bisci *et al*., 2021c).

Durante l'Olocene, l'avvento di un clima sempre più caldo e umido (fino al cosiddetto Optimum Climatico Olocenico) ha indotto un rapido aumento del livello del mare (trasgressione Flandriana, fino a circa 600 anni B.P.). con innalzamenti medi da 0.5 a 1.5 cm/anno (Bisci e Dramis, 1991; Gasparini e Tabacchi, 2011; Acciarri *et al*., 2016; Bisci *et al*., 2021c). Nel contempo, la vegetazione colonizzava velocemente versanti e piane alluvionali, inducendo i fiumi ad approfondire il proprio corso nei detriti accumulati durante la precedente fase fredda (Coltorti, 1991; 1997). La porzione terminale dei corsi d'acqua veniva quindi inondata dalle acque marine, andando a formare profondi *rias* terminanti con *pocket beaches*, separati da alte falesie attive (Coltorti, 1991; 1997; Coltorti e Farabollini, 2008; Bisci *et al*., 2021c).

La prima progradazione storica della costa è avvenuta in epoca romana e non è stata causata da variazioni climatiche, dato che le condizioni erano ancora quelle tipiche della biostasia (clima temperato umido), derivando invece dalla crescente pressione antropica che ha caratterizzato la tarda età del bronzo e, soprattutto, l'età del ferro e che si esplicava in sempre più vaste e diffuse deforestazioni per la raccolta del legname (indispensabile per costruire, cuocere e riscaldarsi) e per liberare terreni per scopi agricoli dato il rapido aumento della popolazione. I *rias* venivano quindi a essere rapidamente colmati di sedimenti, avanzando verso il mare e andando a formare a poche centinaia di metri nell'entroterra diffusi sistemi spiaggia-laguna che lentamente migravano verso mare, come testimoniato da vari ritrovamenti archeologici (Speranza, 1934; Galié, 2001; Bisci *et al*., 2021c; in stampa).

Tra l'inizio del quinto secolo e la metà dell'ottavo, il peggioramento delle condizioni climatiche (Hagerl *et al*., 2007; Fig.3), unito al degrado socio-economico in parte a esso connesso, ha portato a una riduzione della popolazione, e quindi della necessità di disboscare; di conseguenza,

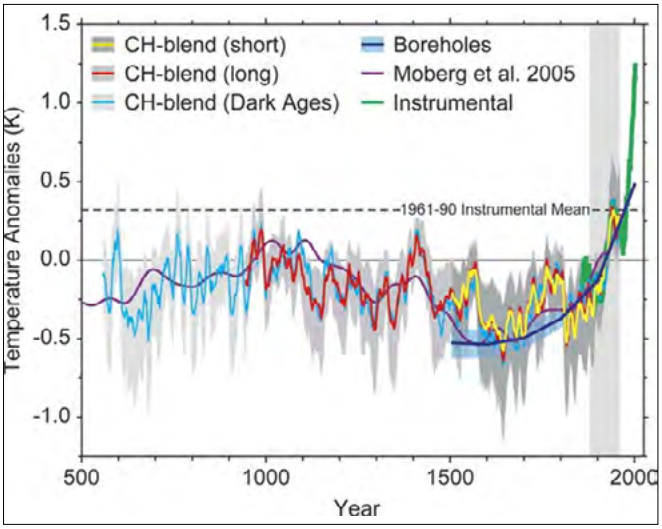


FIGURA 3. Andamento delle variazioni di temperature negli ultimi 2000 anni.

le foreste e i pascoli hanno colonizzato parte dei terreni precedentemente coltivati, con riduzione dell'apporto di materiale solido ai fiumi e, quindi, alle coste che hanno iniziato ad arretrare (Bisci *et al*., 2021c; in stampa).

Il successivo miglioramento climatico (fino all'Optimum Climatico Medievale, intorno al 1100 A.D.; Hagerl *et al*., 2007; Fig. 3) ha poi portato a un'inversione della tendenza, con aumento della popolazione, dei disboscamenti e dei coltivi e, quindi, della produzione dei detriti che ha indotto a un avanzamento prima delle foci fluviali e successivamente alcuni tratti della linea di riva (Abulafia, 2004; Bisci *et al*., 2021c; in stampa).

Questa progradazione è terminata quando in seguito a un peggioramento del clima (Piccola Età Glaciale, dall'inizio del quattordicesimo secolo; Hagerl *et al*., 2007; Fig. 5). La densità di popolazione iniziò a diminuire per poi crollare in conseguenza dell'epidemia di Peste Nera del 1363 che ha dimezzato la popolazione europea, con conseguente abbandono dei coltivi, espansione della copertura vegetale naturale e, quindi, riduzione del carico solido fluviale e arretramento dei litorali (Grove, 2001; Ladurie, 2004; Bisci *et al*., 2021c; in stampa).

In seguito, la popolazione ha iniziato nuovamente a crescere (Ladurie, 2004), spingendo a progressivi interventi di disboscamento e incremento dello sfruttamento agricolo dei terreni, con conseguente aumento della produzione dei detriti che ha indotto una nuova fase di progradazione, soprattutto in prossimità delle foci fluviali (Bisci *et al*., 2021c; in stampa). Quasi tutte le falesie - con esclusione del Promontorio del Conero, della zona del San Bartolo e di piccoli tratti in prossimità di Pedaso – sono quindi divenute inattive, essendo protette dalle spiagge formatesi davanti a loro.

EVOLUZIONE RECENTE DEI LITORALI MARCHIGIANI

Fino alla metà del diciannovesimo secolo, le coste basse hanno continuato a mostrare una tendenza alla progradazione e dune costiere di dimensioni non trascurabili erano presenti alle spalle di quasi tutte le spiagge. In seguito, però

l'attività antropica è divenuta il principale agente morfogenetico, agendo in modo del tutto indipendente dalle condizioni climatiche e ha portato a diffusi fenomeni di erosione costiera.

Il primo severo e generalizzato impatto antropico diretto sulle spiagge è derivato dalla costruzione della Ferrovia Adriatica (1862-1863; Fig. 4), in buona parte – con le eccezioni delle zone del Conero e del San Bartolo - costruita molto vicino alla linea di riva, spesso al di sopra dei depositi dunali, in modo da evitare di attraversare le aree collinari retrostanti, più instabili e che avrebbero richiesto tempi e spese maggiori (Bisci *et al*., 2021c; in stampa). Inoltre, per proteggere il rilevato ferroviario dall'erosione causata dalle mareggiate più intense, in più posti sono state costruite opere di protezione (in massima parte massicciate aderenti), modificando così in modo rilevante la naturale dinamica costiera locale e il relativo trasporto lungo riva dei sedimenti, col risultato di indurre fenomeni di erosione sottoflutto (ovvero a nord delle opere stesse).

A partire dall'inizio del ventesimo secolo, inoltre, lungo molti dei fiumi marchigiani hanno iniziato a essere costruite opere idrauliche rilevanti (dighe, briglie e argini; Fig. 4) che hanno bloccato il normale transito dei sedimenti e modificato l''intera dinamica fluviale. Nello stesso periodo, poi, è anche iniziata la costruzione di moli e pennelli a protezione dei primi porti artificiali, bloccando così la naturale deriva litoranea dei sedimenti (Buli e Ortolani, 1947; Bisci *et al*., 2021c). Nello stesso periodo si è inoltre assistito a un incremento delle opere di rimboschimento, che hanno contribuito a ridurre ulteriormente l'apporto di detriti verso le coste (Gasparini e Tabacchi, 2011; Bisci *et al*., 2021c; in stampa). Nel complesso, quindi si è assistito a una riduzione della velocità media di progradazione e, localmente, all'instaurarsi di fenomeni di erosione costiera che hanno invertito il trend precedente (Bisci *et al*., 2021c; in stampa).

Durante la seconda metà del ventesimo secolo, il boom economico e la rapida crescita di importanza socio-economica del turismo balneare hanno portato a una rapida e caotica urbanizzazione della fascia circa litoranea, con costruzione di strade "lungomare" e strutture turistiche molto vicino alla linea di riva, spesso all'interno della spiaggia emersa e sopra le dune residue. Inoltre, l'enorme aumento di fabbisogno di inerti ha portato all'escavazione incontrollata negli alvei fluviali che, insieme con l'abbandono dei coltivi (soprattutto lungo i pendii) in conseguenza dell'industrializzazione, hanno ridotto molto pesantemente l'apporto solido fluviale, innescando di conseguenza rapidi e diffusi fenomeni di arretramento delle coste (CNR-MURST, 1997; Dramis *et al*., 2011; Bisci *et al*., 2021c; in stampa). Per porre rimedio a questa onerosa perdita di spiagge e ai danni indotti sulle strutture costruite su di loro si è quindi provveduto a costruire opere di difesa rigide di ogni tipo (pennelli, barriere emerse, barriere sommerse e massicciate; Fig. 5) che però non essendo basate su studi della dinamica costiera locale e in assenza di una decente pianificazione territoriale di area vasta hanno in genere avuto come risultato di spostare sottoflutto i fenomeni erosivi, costringendo così nel tempo a costruire via via ulteriori opere, a rincorrere l'arretramento della costa indotto dalle stesse (Aringoli *et al*., 2003; Bisci *et al*., 2021c; in stampa).

La proibizione seppur tardiva dell'estrazione di inerti dagli alvei, insieme con il progressivo massiccio aumento del numero di opere di protezione, che ha trasformato la costa irrigidendola e rendendola artificiale in buona parte della sua estensione, ha comunque portato negli ultimi decenni a una significativa riduzione dei fenomeni di erosione, ora grossomodo bilanciati dai processi locali di progradazione (Bisci e Dramis, 1991; Bisci *et al*., 1992; 2021c; Fig. 5).

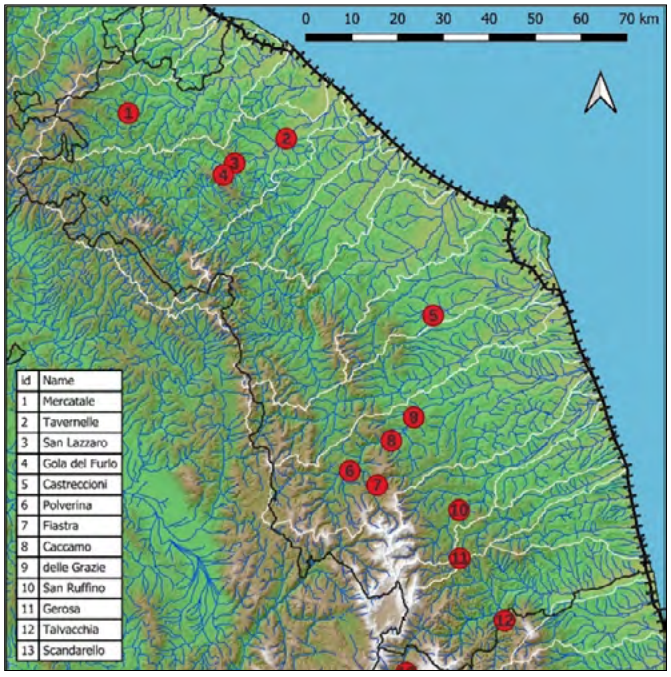


Figura 4. Rete ferroviaria lungo la costa e principali sbarramenti lungo i corsi d'acqua delle Marche.

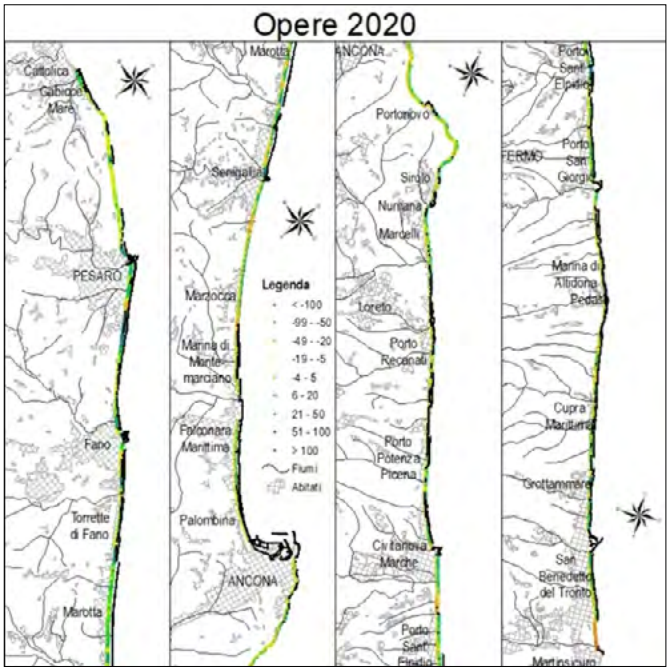


Figura 5. Caratteristiche dei litorali e delle opere di difesa costiera.

LO STATO ATTUALE DELLE DUNE COSTIERE NELLE MARCHE

Attualmente, gli estesi sistemi dunali che caratterizzavano il retrospiaggia delle coste marchigiane fino a circa un secolo e mezzo fa sono quasi completamente scomparse e

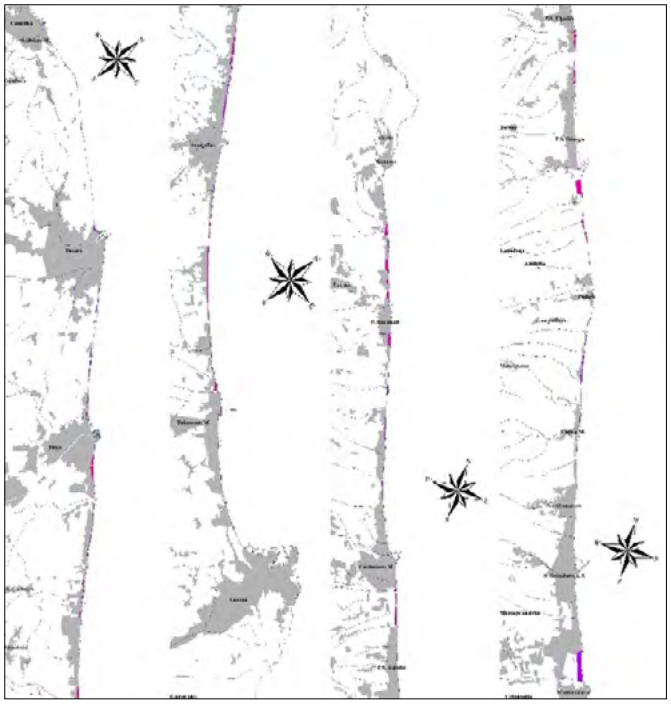


FIGURA 6. Distribuzione dei cordoni dunali lungo la costa marchigiana.

a testimoniare la loro presenza restano solo piccoli lembi relitti e fortemente alterati (Fig. 6).

Un recente studio (Bisci *et al*., 2021a) ha portato a rilevare, analizzare e classificare tutti i resti di dune costiere presenti nelle Marche, oltre alle aree poco antropizzate che potrebbero evolvere in dune, caratterizzandole dal punto di vista morfologico, sedimentologico e botanico-vegetazionale. Ne è risultato che solo su meno di 85 ettari sono presenti resti di questi corpi sedimentari in massima parte a forte rischio di completa sparizione a causa dell'erosione dovuta al moto ondoso e, soprattutto, alle attività antropiche. Tra queste, risultano particolarmente interessanti quelle presenti in prossimità del Fosso Sejore (tra Fano e Pesaro, nella porzione settentrionale della regione) e, soprattutto, quelle che bordano l'estrema porzione meridionale del litorale marchigiano, all'interno della Riserva Naturale Regionale della Sentina, subito a nord della foce del F. Tronto. Sono inoltre stati individuati altri 127 ettari circa di aree di retrospiaggia ancora non troppo alterate dalle attività umane, che se opportunamente protette potrebbero ospitare sistemi dunali nel prossimo futuro.

In massima parte, i lembi residui di dune costiere hanno dimensioni ridotte (al massimo 2 m di altezza e 20 – 25 m li lunghezza) e sono ubicate a una distanza di circa 2- 30 m dalla linea di riva. Localmente, depositi embrionali sono stati individuati in corrispondenza di ostacoli naturali o artificiali. I materiali che formano questi corpi sedimentari sono soprattutto sabbie fini silicee a granulometria abbastanza omogenea (Bisci *et al*., 2021a).

Dal punto di vista botanico-vegetazionale, la tipica vegetazione dunale risulta praticamente sempre molto frammentata, depauperata e fortemente alterata per cui solo raramente si ritrova un pur minima successione delle comunità psammofile, che quasi sempre si limita allo stato di agropireto (dune embrionali), mentre solo raramente si riconosce l'ammofileto (dune mobili). Le cenosi più comuni sono quindi date da specie annuali come *Cakile maritima* e *Salsola kali,* che costituiscono l'associazione *Salsolo kali - Cakiletum maritimae*, spesso compenetrate da specie nitrofile e talora esotiche (Bisci *et al*., 2021a). Molto più rare sono le cenosi perenni, come l'associazione *Echinophoro spinosae - Agropyretum juncei* e *Echinophoro spinosae - Ammophiletum arenariae*; in particolare, quest'ultima è stata rinvenuta solamente in pochissimi siti. Fa eccezione la Riserva Naturale Regionale Sentina dove, grazie alla conservazione delle condizioni tipiche delle coste basse, dovuta al fatto che non vi sono state costruite infrastrutture come altrove (strade, ferrovia, edifici ecc.), si è mantenuta la morfologia tipica che ospita ancora limitati lembi di ambienti di duna e retroduna (Biondi *et al*. 1988; Acciarrri *et al*., 2021; Bisci *et al*., 2021a).

Come è facilmente deducibile dall'analisi dell'evoluzione recente delle spiagge marchigiane, la flora, la vegetazione e gli *habitat* circalitoranei sono stati così pesantemente alterati dalle attività antropiche dirette e indirette, che li hanno resi scarsi e in uno stato di profondo degrado, da renedere quantomai difficile immaginare un loro significativo miglioramento in tempi brevi. Comunque, alcune limitate fasce di vegetazione dunale ancora sopravvivono in un piccolo numero di siti, dove è possibile trovare, anche se frammentati e impoveriti, piccoli nuclei degli *habitats* 1210 [*Annual vegetation of drift lines*], 2110 [*Embryonic shifting dunes*] e 2120 [*Shifting dunes along the shoreline with Ammophila arenaria (white dunes)*] (Biondi *et al*., 1992; Biondi, 1999; Biondi e Casavecchia, 2010; Bisci *et al*., 2021a; in stampa).

IL LITORALE DELLA RISERVA NATURALE REGIONALE DELLA SENTINA

La Riserva Naturale Regionale della Sentina, costituita con Decreto della Regione Marche n. 156 del 14/12/2004 è ubicata all'estremo meridionale della regione ed è delimitata a nord dall'abitato di Porto d'Ascoli, a sud dal tratto terminale del F. Tronto (che costituisce anche il confine con l'Abruzzo), a ovest dalla ferrovia adriatica e ad est dal Mare Adriatico, coprendo una superficie di 177.5 ha (Fig. 7).

Nel suo ambito, sono presenti tre diverse zone di protezione:

- 24.5 ha di zona di protezione per aree naturali fragili;
- 67.2 ha di zona di protezione per la mitigazione degli impatti su habitat e specie;
- 85.7 ha di area di promozione economica e sociale per le attività umane.

Circa 90 ha della Riserva sono state definite nell'ambito della Direttiva Habitat 92/43/EEC come Siti di Importanza Comunitaria (SIC IT5340001 "Costa di Porto d'Ascoli") per la presenza di rilevanti caratteristiche ambientali, includendo un 10% di dune e spiagge (Cod. 1150) e un 15% di lagune costiere (Cod. 2240 e 2120), con aree umide residuali. Circa 121 ha sono stati classificati come Aree di Protezione Speciale (SPA 26 – IT5340022) nell'ambito della Direttiva Uccelli 79/409/EEC.

Nell'ambito dell'area individuata ai fini gestionali dal Piano di Gestione Integrata delle Zone Costiere (Regione

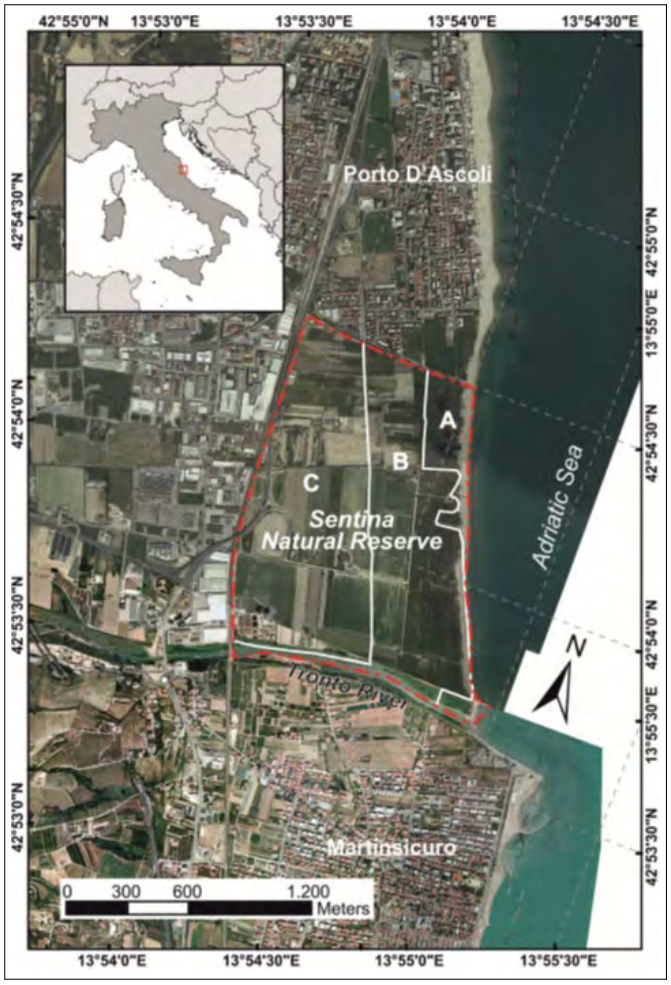


Figura 7. Riserva Naturale della Sentina, ubicata a Nord del Fiume Tronto.

Marche, 2019), che si estende da nord a sud dal porto di S. Benedetto del Tronto fino alla foce del F. Tronto la porzione settentrionale è completamente resa artificiale per circa 4.6 km prima dalle strutture portuali e, quindi, da barriere emerse (3.6 km) e soffolte (circa 1 km) oltre che da due pennelli, fino a sfiorare l'estremo settentrionale dell'area di competenza della Riserva. A sud, in territorio abruzzese, la sponda destra della foce del F. Tronto è armata con un pennello che blocca completamente la naturale deriva dei sedimenti verso nord.

La spiaggia emersa di competenza della Riserva si estende per circa 1.7 km ed è bordata da una sottile duna costiera fortemente degradata che la separa dalla piana retrostante: la mancanza di urbanizzazione in quest'ultima area ha escluso la spiaggia dai piani di protezione costiera delle autorità locali, lasciandola esposta a forti fenomeni di erosione durante le mareggiate che danneggiano sempre più anche i lembi residui delle dune costiere.

LA SPIAGGIA DELLA RISERVA NATURALE REGIONALE DELLA SENTINA

Mediamente, la spiaggia della Sentina è composta per l'11% da ghiaie, per il 33% da ghiaie sabbiose, per il 23% da sabbie ghiaiose e per il 33% da sabbie. La componente più grossolana, più abbondante in prossimità della linea di riva, deriva dallo smantellamento dei materiali portati in passato dal fiume, nonché di opere di difesa prossime al suo sbocco. La maggior parte delle sabbie erose dalla spiaggia emersa sono rideposte a poca profondità lungo la spiaggia sommersa. Quest'ultima, è assai poco acclive (0.6% - 0.9%) ed è formata da sabbie progressivamente più fini verso il largo, dove via via aumenta la frazione limosa. La profondità di chiusura (Dean e Darlimple, 1991), calcolata secondo la formula di Hellermeier (1978; 1981), risulta essere di 7.57 m (Acciarri *et al*., 2021).

Il clima d'onda (APAT, 2004) è caratterizzato da frequenti mareggiate di intensità non troppo elevata da ESE (Scirocco) con rare ma più violente mareggiate da NNE (Bora); le maree sono molto deboli, con ampiezza media intorno ai 40 cm e massima di circa 70 cm. Il sollevamento del livello del mare e le variazioni connesse con attività tettonica e subsidenza non sembrano tali da poter aver influenzato la dinamica del litorale (Antonioli *et aI*., 2019; comunicazione personale; Acciarri *et al*., 2021).

Nel passato, una larga area di transizione, periodicamente soggetta alle esondazioni del F. Tronto, l'entroterra stabile all'ampia fascia sabbioso-ghiaiosa della spiaggia emersa, dove era presente una barra mobile alla foce del fiume (Acciarri *et al*., 2021).

Nel corso del ventesimo secolo, in seguito alla costruzione del lungo pennello che arma la sponda destra della foce del F. Tronto, bloccando la naturale deriva dei sedimenti verso nord, il ripascimento naturale della spiaggia è venuto a essere insufficiente, per cui la linea di riva ha iniziato ad arretrare in conseguenza delle mareggiate. Questa tendenza è poi significativamente aumentata di intensità in seguito alla forte diminuzione dell'apporto di detriti compatibili con la dinamica del moto ondoso da parte del F. Tronto

Tabella 1. Dati utilizzati per l'analisi evolutiva del litorale della Riserva naturale della Sentina.

Dato	Origine	Anni
CTR Vettoriale	Regione Marche	1985; 2000
Ortofoto	Regione Marche	1985; 2000; 2010
Ortofoto	MASE	1995; 2006; 2012
Rilevamento GPS	Autori	2007; 2012; 2013; 2014; 2015
Rilevamento aerofotogrammetrico (EBee)	Autori	2015
Rilievo batimetrico	Autori	2008; 2012
Caratterizzazione sedimentologica	Autori	2008; 2012; 2015
Clima d'onda e vento	Boa di Ortona	1989-2010
Clima d'onda e vento	Boa di Ancona	1999-2006
Vento e maree	ISPRA-Mareografico	2010-2015

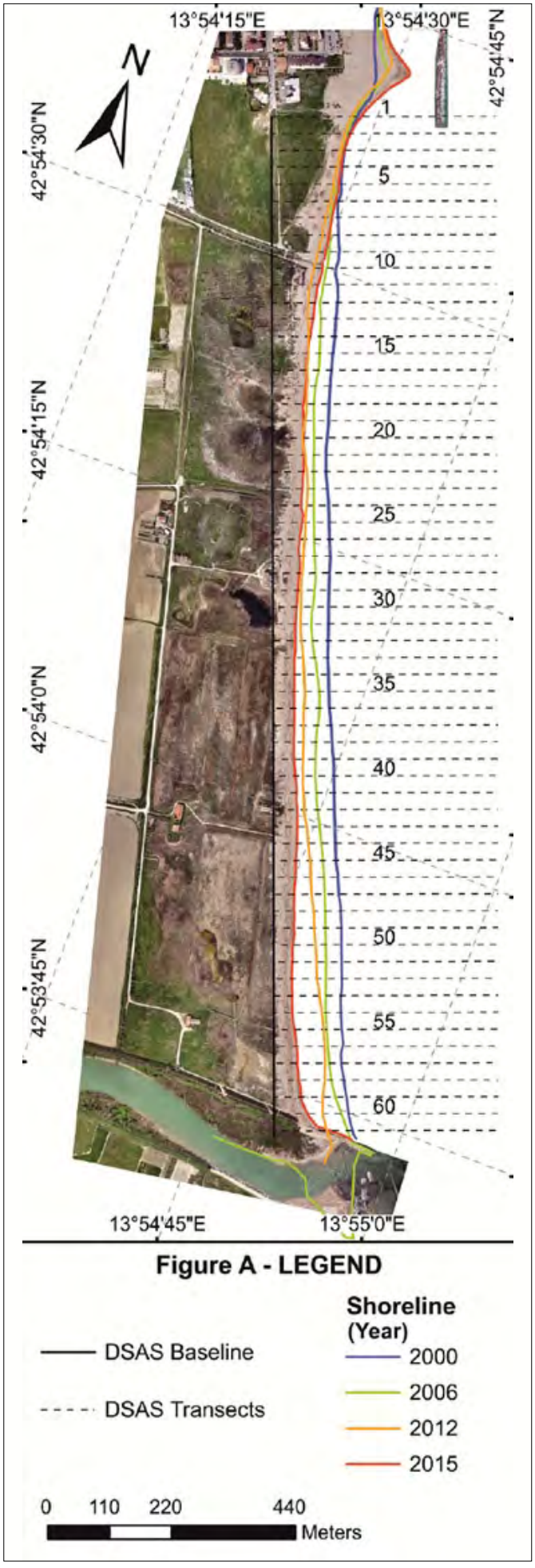


FIGURA 8. Ortofoto del litorale della Sentina con andamento delle linee di riva (2000-2015).

(rimasto l'unica fonte di approvvigionamento della spiaggia) quando negli anni '60 dello scorso secolo sono state costruite strutture idrauliche fluviali (dighe, briglie e argini), si è assistito a un diffuso abbandono dei coltivi lungo le pendici collinari e sono iniziate intense escavazioni di inerti nella porzione terminale dell'alveo (Acciarri *et al*., 2021; Bisci *et al*., 2021c; in stampa). A rendere ancora peggiore la situazione, sono inoltre state costruite le opere di difesa (soprattutto barriere emerse e soffolte) che hanno portato all'irrigidimento dell'intera costa posta tra il porto di S. Benedetto del Tronto e la Riserva, rendendo impossibile anche il ripascimento naturale in occasione delle più rare ma più intense mareggiate da Bora.

Per l'analisi delle variazioni morfologiche e sedimentologiche recenti dell'area di studio, sono stati utilizzati diversi tipi di dati, integrati in un geodatabase gestito tramite ESRI-ArcGIS (Acciarri *et al*., 2021; Tab. 1).

Tra il 1985 e il 2015, la linea di riva media della Sentina è sempre arretrata; per gli ultimi 15 anni, tale arretramento è stato meglio monitorato facendo uso di transetti distanziati di 30 m, ortogonali a una linea retta di riferimento approssimativamente parallela alla line di riva e ubicata nell'entroterra a circa 50 m (Acciarri *et al*., 2021; Fig. 8).

Nella porzione meridionale dell'area di studio, dove nei quindici anni presi in considerazione si è avuto l'arretramento complessivo maggiore, tale valore è arrivato a sfiorare il 90 m (Fig. 9). Nel complesso, si è calcolato che sono stati persi quasi 100000 m^2 di spiaggia; dato che quest'ultima si estende solo per 1.8 km circa, l'arretramento medio è stato quindi di circa 55m (Acciarri *et al*., 2021).

Nel periodo intercorso tra i rilievi topografici del 2012 e 2015 è stata calcolata una perdita complessiva di sedimenti pari a circa 135000 m^3, ancora una volta con maggiore intensità andando da Nord a Sud.

Dal 2000 al 2015 la faccia delle dune esposta al moto ondoso ha subito una notevole erosione, mentre il lato rivolto verso terra è migrato in misura minore verso la linea di riva. Anche in questo caso, i danni maggiori si sono avuti verso sud, in prossimità della foce del F. Tronto, dove l'arretramento ha raggiunto i 15-20 m contro i circa 10 riscontrati nella porzione settentrionale (Acciarri *et al*., 2021). Nel 2012, per la prima volta è stata riconosciuta una discontinuità di circa 100 m nella porzione centrale del sistema dunale, a dimostrazione delle gravi condizioni di instabilità in cui versa il settore.

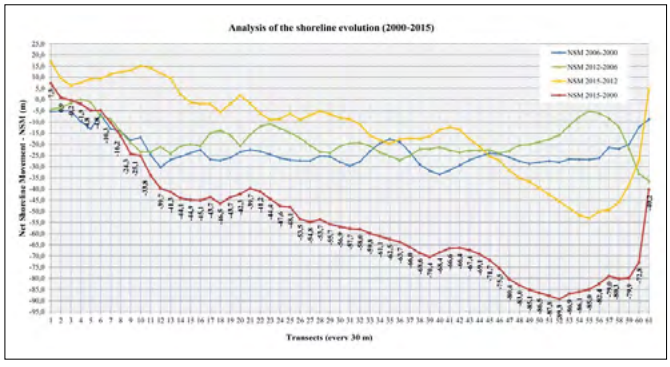


FIGURA 9. Andamento della linea di riva lungo il litorale delal riserva della Sentina.

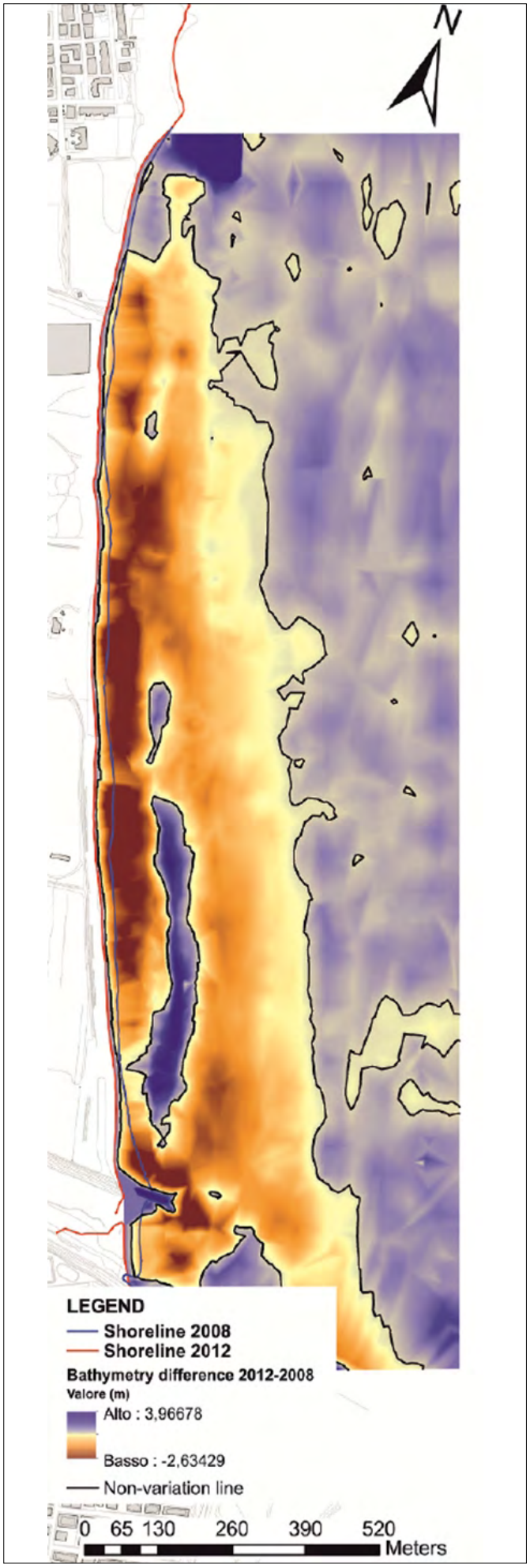


Figura 10. Variazioni topobatimetriche della spiaggia della Sentina.

I rilievi batimetrici del 2008 e del 2012 hanno mostrato una generale tendenza all'approfondimento dei fondali in prossimità della riva che localmente sfiora i 4 m, anche se localmente si hanno inversioni della tendenza con diminuzioni della batimetria fino a oltre 2.6 m (Acciarri *et al*., 2021; Fig. 10).

Le dune sono risultate sempre composte da sabbie fini molto ben sortate con diametri medio di circa un quarto di mm per il 99% del peso. La spiaggia emersa ha granulometria molto variabile localmente, con medie comprese tra circa 0.5 e 32 mm; anche la fascia meno profonda della spiaggia sommersa mostra notevoli variazioni granulometriche (da 0.125 a 22 mm), con zone ricche di ghiaie anche a profondità fino a 3 m. Tra 2008 e il 2012 si è nel complesso evidenziato un leggero incremento medio della frazione grossolana lungo la spiaggia emersa (-0.2 φ lungo la battigia) e della frazione fine in quella sommersa (+ 0.5 φ a 3 m di profondità e + 0.4 φ tra i 5 e i 7 m di profondità). Dal punto di vista mineralogico-petrografico, tutti i depositi risultano composti in prevalenza da calcari con quarzo, frammenti di roccia e, subordinatamente, miche, dolomite, feldspati potassici e plagioclasi. Abbastanza frequenti sono anche i resti di gusci di lamellibranchi e gasteropodi.

CONCLUSIONI

La spiaggia della Sentina è ormai da decenni soggetta a un'intensa erosione che ha portato alla scomparsa di circa il 5% della superficie totale della Riserva (oltre 90000 m^2) a causa dello scarso ripascimento naturale causato da un lato dalla presenza di strutture antropiche rigide a entrambe le sue estremità e dall'altro dal netto calo di detriti abbastanza grossolani trasportati dal F. Tronto, unica sua fonte di sedimenti. Questa tendenza mostra un incremento negli ultimi anni, passando da un arretramento medio annuo della linea di riva di circa 0.6 m tra il 2000 e il 2006 e di circa 0.5 m tra il 2006 e il 2012 a ben 1.4 m tra il 2012 e il 2015 (Acciarri *et al*., 2021).

Anche la spiaggia sommersa risulta instabile, dato che tra il 2008 e il 2012 nella fascia con batimetrie inferiori a 6m ha perso circa 370000 m^3 di sedimenti, in buona parte (circa 220000 m^3) trasportati a nord dalla deriva dei sedimenti e in parte (circa 150000 m^3) rideposti più al largo (Acciarri *et al*., 2021).

Questa erosione interessa pesantemente anche la duna costiera che ne costituisce il retrospiaggia, difendendo la piana altrimenti facilmente invasa dalle acque marine durante le massime mareggiate, dato che l'apporto eolico di materiale fine dalla spiaggia emersa, ormai troppo sottile e a granulometria troppo elevata, non bilancia il materiale portato al largo dalle mareggiate. Allo smantellamento del corpo sedimentario contribuisce anche lo stato di degrado della vegetazione dunale, che non riesce più a intrappolare efficacemente i granuli (Pallottini e Cappucci, 2009). Di conseguenza, l'estensione media dell'apparato dunale dal 1985 al 1995 è passata da circa 57661 m^2 a circa 38246 m^2, per poi scendere a 30698 m^2 nel 2007 e a soli 12338 m^2 nel 2012 (Acciarri *et al*., 2021; Fig. 11).

In base al modello di Short e Masselink (1999), il litorale della Sentina ha una circolazione di transizione con

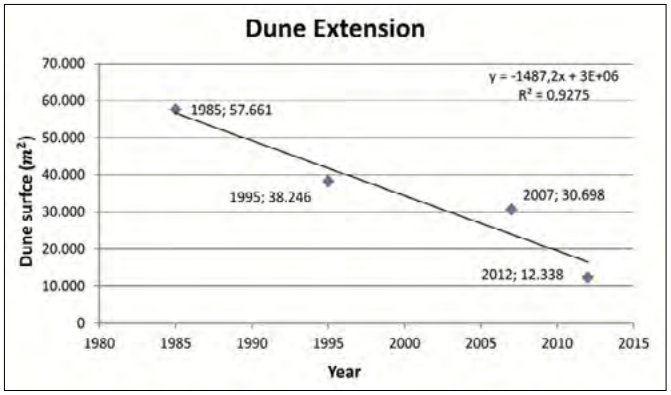


Figura 11. Variazione della estensione della duna della riserva naturale della Setina.

correnti di risucchio disposte simmetricamente lungo la spiaggia sommersa (Acciarri *et al*., 2021). Al crescere dell'intensità delle mareggiate, la spiaggia sommersa può essere progressivamente classificata come *Transverse Bar & Rip* (TBR), *Low Tide Terrace* (LTD) o riflettente (; Taramelli *et al*., 2020; Acciarri *et al*., 2021). Le variazioni annuali della linea di riva mostrano una rotazione intorno al suo centro in funzione delle mareggiate: quelle più frequenti da Scirocco causano arretramento nella porzione meridionale con progradazione a nord, mentre quelle da Bora, in genere più rare ma più energiche, hanno l'effetto opposto (Acciarri *et al*., 2021). Nell'ambito di una progressiva diminuzione di granulometria e aumento della profondità allontanandosi dalla battigia, è stata osservata una barra ghiaiosa derivante dallo smantellamento dei detriti portati dal F. Tronto in passato e di un piccolo pennello posto all'estremo meridionale del litorale a circa 2 m di profondità.

L'idrodinamica locale può quindi essere comparabile con quella di una *pocket beach* (Carter, 1980; 1988) con la foce armata presente in destra idrografica del F. Tronto e la successione di barriere poste a protezione di Porto d'Ascoli che fungono da "promontori" (Acciarri *et al*., 2021).

È utile ricordare che in Italia non è mai stato autorizzato un ripascimento artificiale finalizzato alla protezione di cordoni dunali, anche se l'ampliamento anche temporaneo della spiaggia emersa contribuisce notevolmente alla crescita delle dune e, quindi, alla protezione degli habitat dunali (Direttiva 92/43/EEC). L'ISPRA, sulla base dei dati raccolti nell'area di studio (Acciarri *et al*., 2021) ha sviluppato due diversi strategie per il recupero della fascia costiera della Riserva (ISPRA, 2009).

La prima aveva le caratteristiche di un intervento di emergenza ed è stato messo in pratica nel 2008 dalle Autorità locali e dalla Riserva Naturale, che hanno sversato sulla spiaggia della Sentina circa 10000 m^3 di sabbie dragate dal porto di S. Benedetto del Tronto; questo intervento, però, non ha avuto i risultati sperati sia per la granulometria troppo fine dei sedimenti (D_{50} = 0.125 mm), sia per l'esiguità del volume movimentato. Inoltre, il ripascimento artificiale avrebbe dovuto essere associato a pratiche per favorire la deposizione e la stabilizzazione dei sedimenti dunali, nonché la crescita di vegetazione pioniera.

La seconda è consistita nella valutazione, usando un modello GENESIS con otto diversi scenari (con e senza protezione di pennelli e barriere), delle caratteristiche ottimali di un ripascimento artificiale in grado di mantenere almeno per trenta anni una spiaggia emersa ampia tra i 30 e i 60 m anche tenendo conto del previsto sollevamento del livello del mare.

Dal 2009, poi, si è suggerito di proteggere le dune utilizzando semplici ed economiche tecniche di ingegneria naturalistica, come l'installazione di barriere frangivento e la piantumazione di specie vegetali idonee (Bovina *et al*., 2009).

BIBLIOGRAFIA

Abulafia D. (2004). *Italy in the Central Middle Ages*. OUP Oxford, 299 pp.

Acciarri A., Bisci C., Cantalamessa G., Cappucci S., Conti M., Di Pancrazio G., Spagnoli F., Valentini E. (2021). *Metrics for short-term coastal characterization, protection and planning decisions of Sentina Natural Reserve, Italy*. Ocean & Coastal Management, 201, 105472.

Acciarri A., Bisci C., Cantalamessa G., Di Pancrazio G. (2016). *Anthropogenic influence on recent evolution of shorelines between the Conero Mt. and the Tronto R. mouth (southern Marche, Central Italy)*. Catena, 147, 545-555.

Antonioli F., Defalco G., Moretti L., Anzidei M., Bonaldo D., Carniel S., Leoni G., Furlani S., Lo Presto V., Mastronuzzi G., Petitta M., Vecchio A., Sannino G., Schicchitano G. (2019). *Relative sea level rise and potential flooding risk for 2100 on 15 coastal plains of the Mediterranean Sea*. Geophys. Res. Abstr., 21, 2019–5274.

APAT (2004). *Atlante delle Coste. Il moto ondoso a largo delle coste italiane*. http://www.isprambiente.gov.it/it/servizi-per-lambiente/stato-delle-coste/atlante-delle-coste.

AQUATER (1982). *Studio generale per la difesa delle coste: Prima fase*. Aquater, S. Lorenzo in Campo (PU), 706 pp.

Aringoli D., Bisci C., Cantalamessa G., Di Celma C.N., Farabollini P., Gentili B., Materazzi M., Pambianchi G. (2003). *Recent variations of central Adriatic coastline*. In: CERG - *Geomorphological Sensitivity and Systems Response*, 13–20.

Biondi E. (1999). *Diversità fitocenotica degli ambienti costieri italiani*. Boll. Museo Civico Sc. Nat Venezia, 49, 39-105.

Biondi E., Brugiapaglia E. Allegrezza M., Ballelli S. (1992). *La vegetazione del litorale marchigiano (Adriatico centro-settentrionale)*. Coll. Phytosociologiques, 19, 430-459.

Biondi E., Casavecchia S. (2010). *The halophilous retro-dune grasslands of the Italian Adriatic coastline*. Braun-Blanquetia, 46, 111-127.

Biondi E., Géhu J.-M., Ballelli S. (1988). *La vegetazione della "Sentina" di Porto d'Ascoli (Adriatico centrale): un ambiente umido da recuperare*. Micologia e Vegetazione Mediterranea, 3(1), 31-46.

Bisci C., Cantalamessa G., Casavecchia S., Gasparri R., Pesaresi S., Spagnoli F., Scalella G., Tramontana M., Zitti S., Parlani S., Sinigaglia M., Forchielli G., Mazzoli F., Magnoni D., Bellino C., Pernini D. (2021a). *Protezione e valorizzazione delle dune costiere residue nelle Marche*. Studi Costieri, 30, 93-144.

Bisci C., Cantalamessa G., Casavecchia S., Spagnoli F., Tramontana M. (in stampa). *Coastal dunes along the Marche littoral (adriatic side of Central Italy)*. Proc. Symp. Mediterranean Coastal Areas.

Bisci C., Cantalamessa G., De Marco R., Spagnoli F., Tramontana M. (2021b). *Caratteri oceanografici dell'Adriatico centro-settentrionale e della costa Marchigiana*. Studi Costieri, 30, 7-12.

Bisci C., Cantalamessa G., Spagnoli F., Tramontana M. (2021c). *Evoluzione storica e attuale del litorale delle Marche*. Studi Costieri, 30, 13-34.

Bisci C., Dramis F. (1991). *La geomorfologia delle Marche*. In: AA.VV. - *L'ambiente fisico delle Marche*, Firenze, SELCA, 81–113.

Bisci C., Dramis F., Gentili B (1992). *Recent and present geomorphological evolution of river beds in the southern portion of the Marche region (Central Italy)*. Geoöko Plus, 3, 83–96.

Bovina G., Amodio M., Callori di Vignale C. (2009). *L'approccio naturalistico nella conservazione e restauro degli ambienti dunali*. AA.VV., *Il ripristino degli ecosistemi marino-costieri e la difesa delle coste sabbiose nelle aree protette*. Rapporto ISPRA, 100, 393–674.

Buli U., Ortolani M. (1947). *Le spiagge marchigiane*. Coop, Tipografica Azzoguidi, Bologna, 151 pp.

Carter R.W.G. (1980). *Vegetation stabilisation and slope failure on eroding sand dunes*. Biol. Conserv. 18, 117–122.

Carter R.G.W. (1988). *Coastal Environments: an Introduction of Physical, Ecological and Cultural Systems*. Academic press, London, 617 pp.

CNR - MURST (1997). *Atlante delle spiagge italiane. Dinamismo, tendenza evolutiva, opere umane*. Edit. SELCA Firenze, 108 fogli in scala 1:10000.

Coltorti M. (1991). *Modificazioni morfologiche oloceniche nelle piane alluvionali marchigiane: alcuni esempi nei fiumi Misa, Cesano e Musone*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 14, 73–86

Coltorti M. (1997). *Human impact in the Holocene fluvial and coastal evolution of the Marche region, Central Italy*. Catena, 30, 311–335.

Coltorti M., Farabollini P. (2008). *Late Pleistocene and Holocene fluvial–coastal evolution of an uplifting area:the Tronto River (Central Eastern Italy)*. Quatern. Int., 189, 39–55.

Dean R.G., Darlimple R.A. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific Press, Singapore, 353 pp.

Dramis F., Aringoli D., Bisci C., Cantalamessa G., Coltorti M., Farabollini P., Gentili B., Materazzi M., Nesci O., Pambianchi G., Pierucchini P., Savelli D., Troiani F. (2011). *La Costa delle Marche*. In: Ginesu S. (Ed.), *La Costa d'Italia*. Delfino Ed., Sassari, 379–392.

Galiè V. (2001). *Ubicazione dei porti e del navale fermano in epoca romana e altomedievale tra il Potenza e il Tronto alla luce delle carte di Farfa e del Codice 1030*. Macerata, 70 pp.

Gasparini P., Tabacchi G. (2011). *L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC 2005*. Secondo inventario forestale nazionale italiano. Metodi e risultati. Min. Politiche Agr., Alim. e For.; C.F.S.. Cons. Ricerca e Sperim. in Agricoltura, U.R. per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Edagricole-Il Sole 24 ore, Bologna, 653 pp.

Grove A.T. (2001). *The "Little Ice Age" and its geomorphological consequences in Mediterranean Europe*. Clim. Change, 48, 121–136.

Hallermeier R.J. (1978). *Uses for calculated limit depth to beach erosion*. Proc. 16th Intern. Conf. on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers, New York, 1493–1512.

Hallermeier R.J. (1981). *A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate*. Coast. Eng., 4, 253–277.

Hegerl G.C., Crowley T.J., Allen M., Hyde W.T., Pollak H.N., Smerdon J., Zorita E. (2007). *Detection of Human Influence on a New, Validated 1500-Year Temperature Reconstruction*. J. of Climate, 20(4), 650-666.

ISPRA (2009). *Implementazione di modelli numerici per l'analisi dei problemi della fascia costiera prospiciente la riserva naturale della Sentina*. RRNS-FC-01.07, 77 pp.

Ladurie E.L.R. (2004). *Histoire humaine et comparée du climat, volume 1: Canicules et glaciers (XIIIe-XVIIIe siècles)*. Fayard, Paris, 739 pp.

Pallottini E., Cappucci S. (2009). *Beach-dune system interaction and evolution*. Rendiconti online Soc. Geol. It., 8, 87–97 (ISSN: 2035-8008).

Pranzini E. (1994). *Bilancio sedimentario ed evoluzione storica delle spiagge*. Il Quaternario, 7, 197–204.

Pranzini E. (1995). *Cause naturali ed antropiche nelle variazioni del bilancio sedimentario dei litorali*. Riv. Geogr. Ital., NS 1, 47–62.

Regione Marche (2019). *Piano di Gestione Integrata delle Zone Costiere (Piano GIZC)*. BUR Marche, 100.

Short A.D., Masselink G. (1999). *Embayed and structurally controlled beaches*. In: Short A.D. (Ed.), *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. John Wiley & Sons, 230–250.

Speranza G. (1934). *Il Piceno dalle origini alla fine d'ogni sua autonomia sotto Augusto*. L. Cardi, Ancona, 2v, 142 pp.

Storms J.E.A., Weltje G.J., Terra G.J., Cattaneo A., Trincardi F. (2008). *Coastal dynamics under conditions of rapid sea-level rise: Late Pleistocene to early Holocene evolution of barrier–lagoon systems on the northern Adriatic shelf (Italy)*. Quaternary Sci. Rev., 27, 1107–1123.

Taramelli A., Cappucci S., Lisi I., Valentini E., Rossi L. (2020). *Nearshore sand bar characterization with LiDAR data*. Remote Sens. SI, 12 (8), 1053. https://doi.org/ 10.3390/rs12071053.

Risposta del litorale delle Marche meridionali alla costruzione di opere di difesa

Response of the southern Marche coast to the construction of defense works

Matteo Beleggia
Dottore in Geologia

E-mail: matteoblg@virgilio.it

Parole chiave: spiagge, opere di difesa, erosione, Marche meridionali, Italia
Key words: beaches, defense works, erosion, Southern Marche, Italy

RIASSUNTO

Le opere di difesa sono da sempre il metodo più diffuso ed utilizzato a scala globale per cercare di arginare l'erosione costiera, che altro non è che l'espressione di un deficit sedimentario del "sistema spiaggia" determinato dall'eccedenza delle uscite rispetto alle entrate.

Nei circa 72 km di litorale delle Marche meridionali, nel tratto che va dal porto di Numana a nord alla foce del fiume Tronto a sud, nel corso degli anni sono state costruite moltissime opere, di diversa tipologia. Il seguente studio è incentrato proprio sulla risposta che il litorale marchigiano ha avuto allo loro costruzione e a tal fine sono stati usati due diversi approcci: morfologico e tessiturale.

In primo luogo è stata studiata l'evoluzione della linea di riva partendo dai primi dati disponibili di sufficiente accuratezza, come la cartografia I.G.M. del 1894, e analizzando le successive carte tecniche regionali e ortofoto. Ciò è stato effettuato in ambiente GIS, e utilizzando metodi di analisi diversi (variazione areale e variazione su transetti). Si è quindi potuto valutare sia l'impatto dei porti sul trasporto litoraneo sia l'efficacia o meno delle varie opere di difesa realizzate.

I dati dell'evoluzione morfologica sono stati confrontati con quelli relativi alle caratteristiche tessiturali di 60 campioni di sedimenti, per sapere come questi rispecchino i diversi livelli di energia da moto ondoso determinati dalle varie scogliere emerse e sommerse e dai pennelli.

Sugli stessi campioni è stata fatta la determinazione del colore nello spazio CIEL*a*b* per definire in modo semispeditivo le direzioni del flusso sedimentario, considerando le diverse litologie che affiorano nei bacini di alimentazione.

Dalle analisi sono emersi alcuni importanti risultati, il più importante dei quali è il fatto che nel complesso l'area è in avanzamento, con 269.424 m^2 di superficie di spiaggia guadagnata rispetto al 1894; ma soprattutto che negli ultimi 30-35 anni, grazie proprio alla strategia di difesa messa in atto dalla Regione Marche negli anni '80 si sono verificati i risultati più importanti, infatti dal 1988 ad oggi la superficie di spiaggia è aumentata di 570.281 m^2.

Le opere costruite hanno inoltre, un impatto notevole sulla sedimentologia delle spiagge, che risulta più fine nelle zone difese, soprattutto nelle zone ove sono presenti le barriere parallele emerse.

Il quadro che emerge consente una valutazione positiva degli interventi realizzati, almeno in termini di difesa costiera. L'analisi del loro impatto sul paesaggio costiero, sulla riduzione della resilienza, sulla qualità dell'acqua e sulla sicurezza nella balneazione va oltre lo scopo di questo lavoro, ma non deve quindi essere considerato un aspetto secondario di gestione dell'erosione costiera.

ABSTRACT

Defense works have always been the most widespread and used method on a global scale to try to stem coastal erosion, which is nothing more than the expression of a sedimentary deficit of the "beach system" determined by the excess of the outlets compared to enter.

In the approximately 72 km of coastline of the southern Marche, in the stretch that goes from the port of Numana in the north to the mouth of the Tronto river in the south, many different types of defense works have been built over the years. The following study focuses precisely on the response that the Marche coast had to their construction and to this end different approaches were used: morphological, textural and colorimetric.

First, the evolution of the shore line was studied starting from the first available data of sufficient accuracy, such as the I.G.M. of 1894, and analyzing the subsequent regional technical maps and orthophotos. This was carried out in a GIS environment, and using different analysis methods (areal variation and variation on transects). It was therefore possible to assess both the impact of the ports on coastal transport and the effectiveness or otherwise of the various defense works carried out.

The data of the morphological evolution were compared with those relating to the textural characteristics of 60 sediment samples, in particular to find out how these reflect the different energy levels of wave motion determined by the various emerged and submerged cliffs and groynes.

The color determination in the CIEL * a * b * space was carried out on the same samples to define in a quick survey the directions of the sedimentary flow, considering the different lithologies that emerge in the feeding basins.

Some important results emerged from the analyzes, the most important is the fact that overall the area is in progress, with 269,424 m^2 of beach area gained compared to 1894;

but especially in the last 30-35 years, thanks to the defense strategy implemented by the Marche region in the 1980s, the most important results have occurred, in fact from 1988 to today the beach area has increased by 570,281 m^2.

The built works also have a notable impact on the sedimentology of the beaches, which is finer in the defended areas, especially in the areas where parallel emerged barriers are present.

The picture that emerges allows for a positive evaluation of the interventions made, at least in terms of coastal defense. The analysis of their impact on the coastal landscape, on the reduction of resilience, on the quality of water and on safety in bathing is beyond the scope of this work, but it should not therefore be considered a secondary aspect of coastal erosion management.

GENERALITÀ

La costa marchigiana costituisce un'unità morfodinamica complessa, formata da settori con problematiche differenti sia dal punto di vista morfologico che evolutivo (Acciarri, 2016; Bisci *et al.*., 2021a), che si estende tra il promontorio di Gabicce e la foce del Fiume Tronto, per circa 172 Km, di cui 28 Km di costa alta e 144 Km di costa bassa. È suddivisa in due settori quasi rettilinei, disposti in direzione NO-SE a nord del promontorio del M. Conero e circa NNO-SSE a sud. Nel presente lavoro viene investigata questa seconda porzione del litorale. Tale andamento segue quello della retrostante catena appenninica umbro-marchigiana che, proprio nella parte centrale delle Marche, compie una virgazione.

I litorali ghiaioso-sabbiosi sono generalmente corrispondenti alle piane alluvionali costiere dei fiumi, mentre strette fasce di litorali sono presenti alla base delle numerose falesie arretrate, che sono orientate parallelamente alla linea di riva attuale (Acciarri, 2016; Bisci *et al.*., 2021a). Uniche eccezioni a tale morfologia sono costituite dai rilievi costieri del Monte San Bartolo (a nord di Pesaro), dal promontorio del Monte Conero (a sud di Ancona) e dalla falesia attiva, anche se ormai completamente protetta da opere di difesa radenti, di Pedaso, più a sud.

Figura 1. Bacini idrografici dei principali corsi d'acqua delle Marche meridionali. Il bacino del fiume Tronto è parziale, in quanto esso si estende anche in parte del Lazio e dell'Abruzzo.

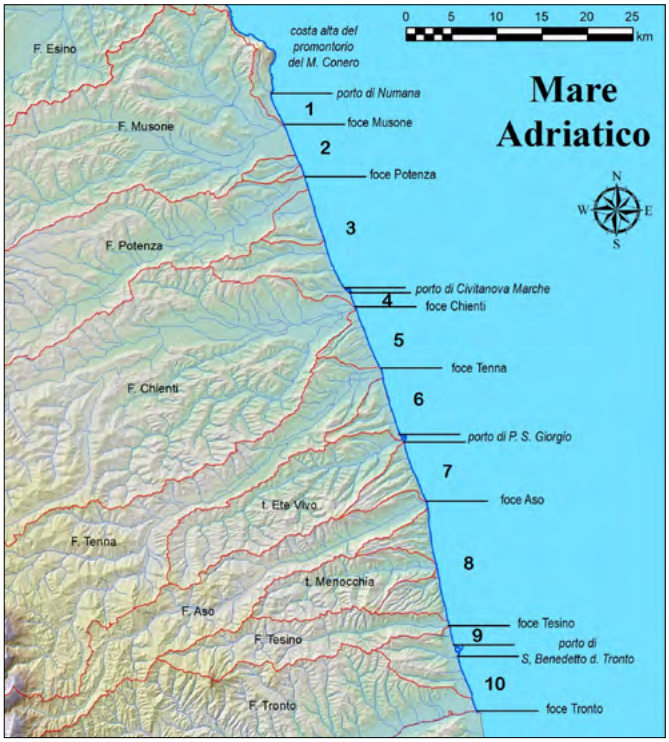


Figura. 2. Suddivisione in unità fisiografiche della costa marchigiana meridionale.

I principali corsi d'acqua presentano, nei loro tratti terminali, un andamento quasi perpendicolare alla linea di costa, con direzione SO-NE nel settore a nord del Conero e OSO-ENE nel settore a sud. I principali fiumi marchigiani che sfociano lungo il tratto di litorale di interesse del presente studio sono, andando da nord a sud: Musone, Potenza, Chienti, Tenna, Aso, Tesino e Tronto; vengono inoltre citati poiché ritenuti di interesse i torrenti Ete Vivo e Menocchia (Fig. 1).

Nell'ambito del litorale marchigiano analizzato, tenendo conto del fattore naturale (foci fluviali) e considerando il fattore antropico (grandi porti), si possono riconoscere dieci unità fisiografiche secondarie (UFCS; Fig. 2).

INQUADRAMENTO METEOMARINO

Dallo studio del moto ondoso, fattore molto significativo nell'influenzare il trasporto sedimentario lungo-costa, e dall'analisi dei dati (Boa RON di Ancona, ISPRA) risulta che nel periodo 2000-2006 vi siano state in totale 218 mareggiate, dove per mareggiata si intende "una successione di stati ondosi in cui l'altezza d'onda è stata maggiore a 1 m per almeno 12 ore, eventuali periodi di attenuazione dell'onda sotto questa soglia lunghi non più di 6 ore e direzione di provenienza dei vari stati ondosi compresi all'interno di un range di circa 30° rispetto alla direzione di origine" (APAT, 2004), di cui 160 provenienti fra 0° e 180° N: il 77% dal I quadrante e il 33% dal II quadrante.

Le principali direzioni di provenienza dei moti ondosi sul litorale marchigiano sono due: da N-NE (15-45 °N) e da E-SE (120-150 °N), con brevi ma intensi eventi provenienti da Levante (E). In particolare, possiamo fare una

distinzione fra "moto regnante", ovvero quello che investe il litorale per il maggior numero di giorni durante l'arco di un anno, e "moto dominante", che investe il litorale con maggior intensità. Nel nostro caso è da considerare come "regnante" il mare proveniente da Scirocco (SE-E) e "dominante" quello da Bora o Grecale (NE-E).

Sulla base di tali considerazioni il litorale in oggetto caratterizzato, salvo casi localizzati, da una generale deriva litoranea lungo costa diretta verso nord, sospinta dalle correnti da Scirocco (Fig. 3; Acciarri, 2010; Bisci *et al.*., 2021b).

Quindi nella definizione di lato sottoflutto e lato sopraflutto di qualsiasi struttura si fa riferimento rispettivamente alla porzione nord e a quella sud.

marchigiano, costruite a partire dagli anni '60, incrementate con un grande piano negli anni '80 e tutt'oggi in fase di costruzione, come approvato dal Piano GIZC del 2018.

Dei 72 km di litorale in esame, oltre 57 sono protetti con opere di difesa rigide (Fig. 4); considerando inoltre che in questo tratto sono presenti 4 porti (Numana, Civitanova, Porto San Giorgio, San Benedetto del Tronto), i tratti non difesi si estendono per meno di 15 km, circa il 20%. L'intervento antropico è ed è stato quindi molto importante a partire dalla costruzione dei porti, avvenuta già dai primi del '900 (il primo molo del porto di San Benedetto risale al 1907, di età simile è quello di Civitanova Marche, mentre il porto di Porto San Giorgio è stato terminato nel 1984).

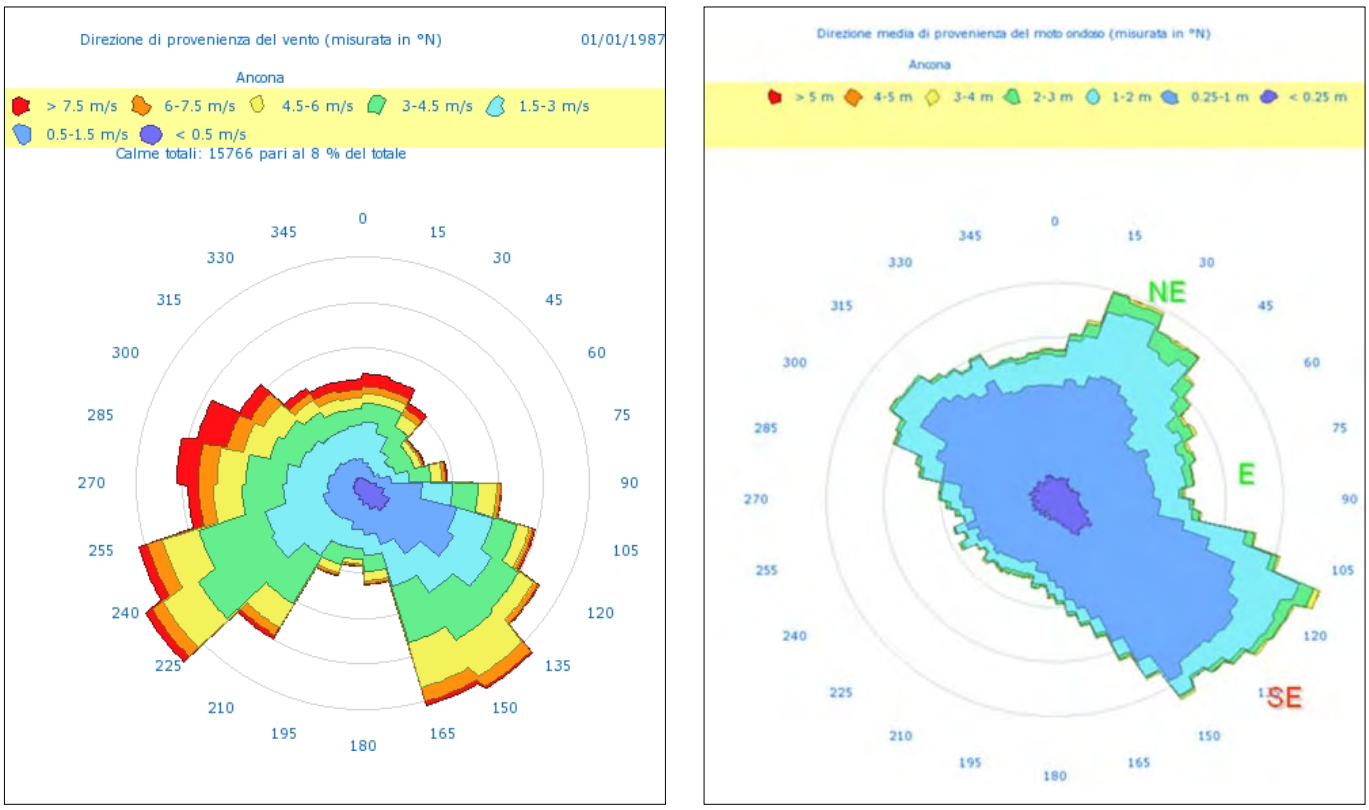


FIGURA 3. Direzione del vento (A) e direzione di provenienza del moto ondoso (B) del porto di Ancona (ISPRA, 1987).

OPERE DI DIFESA

Le opere di difesa costiera vengono realizzate per difendere i litorali e le costruzioni prossime ad essi (strade, ferrovie ecc.) dall'erosione operata dal moto ondoso. Esistono molteplici tipologie di opere dalle più rigide alle più morbide. Tra le prime ci sono le barriere o scogliere aderenti che tendono a bloccare la linea di riva irrigidendola e sono in genere usate per la protezione di ferrovie, strade e manufatti direttamente minacciati dalle mareggiate. Lungo il litorale marchigiano sono state costruite barriere aderenti a protezione della ferrovia Adriatica già dalla fine dell'800 (Piano GIZC, 2018).

Altre tipologie di opere rigide sono i pennelli e le barriere parallele; i primi sono opere perpendicolari a riva, volti ad intercettare il flusso sedimentario lungo costa; le seconde invece sono poste parallelamente al litorale e possono essere emerse e sommerse, le prime più efficaci a bloccare l'erosione del moto ondoso, ma sicuramente più impattanti da un punto di vista visivo e di ossigenazione delle acque, rispetto alle seconde. Le barriere parallele emerse sono le opere più diffuse nel litorale

Di natura diametralmente opposta sono i ripascimenti artificiali che vengono considerati opere "morbide" e consistono nel versamento di detriti idonei in vari punti del profilo di spiaggia, aumentando artificialmente l'apporto sedimentario di un tratto di spiaggia. Queste tipologie di intervento, lungo la costa marchigiana non sono state impattanti quanto le difese rigide e nel corso degli anni sono stati effettuati pochissimi lavori, il primo dei quali solamente nel 1985.

Un intervento di ripascimento è stato effettuato nel 2009-2010 a nord del fiume Musone, nel Comune di Numana, riversando nella spiaggia circa 200'000 m^3 di ghiaia proveniente da una cava.

Un altro intervento è stato effettuato nel Comune di Porto Sant'Elpidio nel 1985 contemporaneamente alla costruzione di un sistema composto da una barriera soffolta collegata a riva da 2 pennelli, uno dei quali sommerso; soluzione che è stata ripetuta prima nel 2005 quando le opere sono state sistemate e poi nel 2018, quando è stato effettuata una terza alimentazione artificiale, con 45'000 m^3 di materiale.

Figura 4. Distribuzione delle opere di difesa rigide lungo il litorale "Piceno" (modificato da Bisci *et al.*., 2021a).

Tra il 2007 e il 2009 è stato realizzato un progetto finanziato da Stato e Regione, che consisteva nel ripascimento con sabbie relitte dragate dal fondale dell'Adriatico antistante, per un totale di circa 450'000 m^3. Si trattava però di sabbie molto fini (diametro medio poco superiore al decimo di mm) e scure, molto diverse quindi dal materiale che caratterizza le spiagge marchigiane (Bisci *et al.*., 2021). I tratti di costa interessati da questi interventi, che sono stati subito smantellati dal moto ondoso, sono ubicati nei Comuni di Civitanova Marche, Fermo (frazione Marina Palmense), Pedaso, Campofilone, Massignano e Grottammare.

Infine negli ultimi 2 km della regione, che corrispondono alla Riserva della Sentina, nel 2008 è stato effettuato un piccolo ripascimento con 10'000 m^3 di sabbie prelevate dragando il porto di San Benedetto del Tronto. Interventi simili sono stati eseguiti anche nel Comune di Pedaso, dragando le sabbie del porticciolo: l'ultimo intervento risale al 2016, quando sono stati riversati nella spiaggia sommersa circa 5'000 m^3 di sedimenti (Fig. 5).

ANALISI EVOLUTIVA DELLA LINEA DI RIVA

La linea di riva è l'indicatore più frequentemente utilizzato per definire la tendenza evolutiva delle coste basse, poiché semplice e rapido da rilevare. Nel presente lavoro sono state valutate 6 linee di riva desunte da carte topografiche ed ortofoto:

- *1894 - Carta topografica IGM 1892/95, scala 1:50000*
- *1948 - Carta topografica aggiornata IGM 1948/53, scala 1:25000*
- *1988 - Ortofoto carta, scala 1:10000*
- *1999 - CTR, Carta Tecnica Regionale, scala 1:10000*
- *2010 - Ortofoto carta*
- *2020 - Ortofoto carta*

L'analisi è stata effettuata con due diverse metodologie:

1. Transept Based Analysis (TBA), che viene svolto grazie ad un applicativo GIS chiamato DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) che consente di calcolare le variazioni di una serie di linee di riva di diversi periodi. A tal fine, il DSAS traccia, a partire da una linea base, dei transet-

Figura 5. Porticciolo di Pedaso, soggetto di frequente a insabbiamento (Sandro Grifi ph.).

ti perpendicolari ad essa la cui interdistanza viene data dall'operatore (in questo caso 200 metri). Si individuano le intersezioni fra i transetti e le linee di riva e si calcolano le distanze dalla linea base, successivamente sottraendo i valori fra due diversi periodi ottiene l'entità dell'avanzamento o dell'arretramento eventualmente avvenuti, questo valore tra le due linee di riva, detto NMS (*Net Shoreline Movement*), rappresenta, per ogni transetto, la distanza fra la linea di riva più vecchia e quella più recente.

2. Surface Variation Analysis (SVA), che consiste nel valutare lo spostamento medio della linea di riva e viene calcolato dividendo la variazione areale della spiaggia emersa per la lunghezza del settore stesso. L'SVA consente di determinare lo spostamento medio "effettivo" della linea di riva nei vari settori costieri (Pranzini, Simonetti, 2008).

Le aree sono state calcolate per tratti di 400 m, quindi il doppio dei transetti, distribuite in modo che ogni transetto possa ricadere al centro di ogni area; rendendo possibile un paragone tra i due metodi, confrontando la differenza areale tra le due linee di riva per ogni metro lineare con il NMS. I risultati sono diversi poiché nei tratti rettilinei le differenze fra i due metodi sono minime, mentre nei tratti più articolati, zone con cuspidi o salienti le differenze possono risultare molto significative. Alcuni esempi nella Fig. 6:

a. La differenza è dovuta alla morfologia articolata della linea di riva, con il transetto centrale in corrispondenza di un tombolo che dà un valore positivo, mentre valutando tutta l'area si vede che nella zona prevale l'erosione.
b. Il transetto centrale è corrisponde al molo di un porticciolo: quindi l'avanzamento medio di questo tratto di costa è sovrastimato con il metodo TBA rispetto alla realtà.
c. Il tratto di costa è regolare e i due metodi sono validi entrambi, dato che l'erosione è costante in tutti i 400 metri in esame.

Per l'analisi è stato quindi scelto il metodo SVA, che nel complesso è più preciso e riduce gli errori riportati negli esempi.

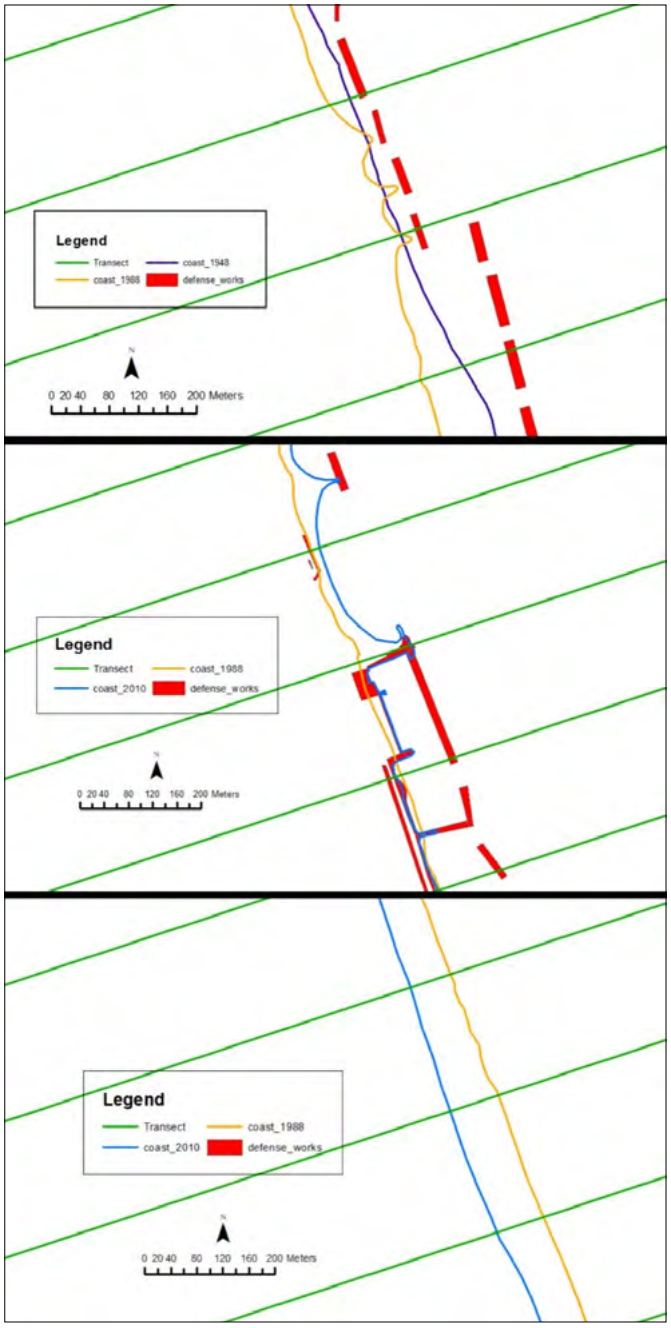


FIGURA 6. Esempi dei metodi utilizzati per il calcolo delle linee di riva.

CAMPIONAMENTO SEDIMENTOLOGICO

Al fine di caratterizzare da un punto di vista granulometrico il litorale in esame sono stati prelevati 60 campioni di sabbia dalla spiaggia emersa, precisamente sulla battigia.

Il materiale prelevato è stato poi analizzato in laboratorio e setacciato a secco in una pila a maglie quadrate decrescenti verso il basso con intervallo di 0,5 phi, prendendo come riferimento la scala di Wentworth del 1922.

Il materiale trattenuto in ogni setaccio è stato pesato e dai dati ottenuti sono state ricavate le percentuali in peso

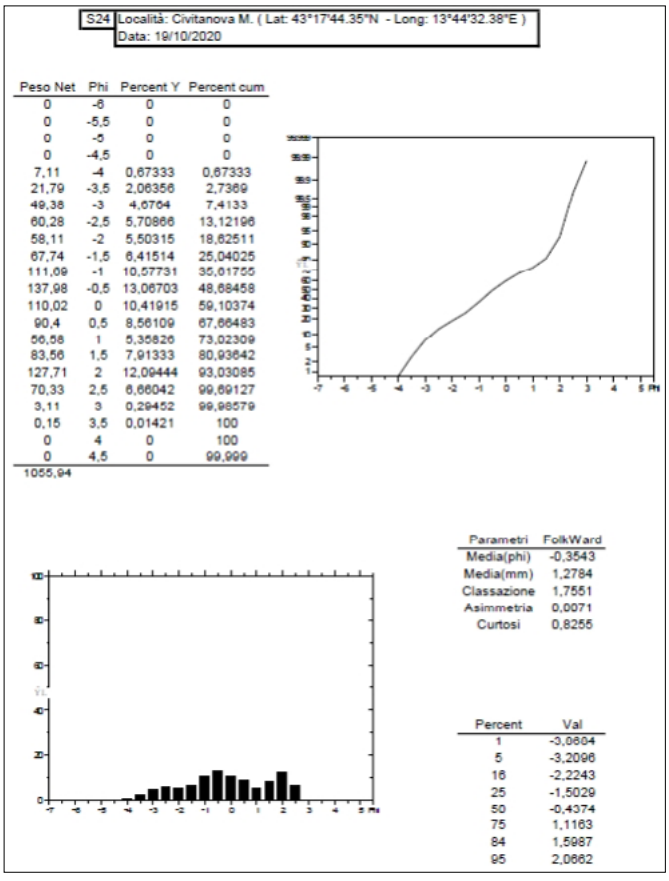


FIGURA 7. Esempio di scheda di caratterizzazione dei sedimenti campionati lungo la battigia.

delle relative classi, producendo i relativi istogrammi e le curve di distribuzione granulometricae ricavando i parametri di Folk e Ward (1957) e i valori dei percentili (Fig. 7).

RISULTATI

Analisi evolutiva della linea di riva

La linea di costa più antica, datata 1894, ci mostra un litorale privo di difese, di porti e manufatti; con il passare degli anni l'intervento antropico ha poi fortemente alterato il litorale, costruendo opere che hanno pesantemente modificato l'andamento originario della riva e la dinamica costiera.

Gli intervalli analizzati sono: 1894-1948, 1948-1988, 1988-1999, 1999-2010, 2010-2020 ed infine 1984-2020, 1894-1988 e 1988-2020. Così da osservare se ci sono state variazioni significative della linea di riva e di conseguenza i mq di spiaggia guadagnati o persi, sia per l'intero tratto, sia per ognuna delle 10 unità fisiografiche in cui esso è stato diviso.

Nell'intervallo di tempo tra il 1894 e il 1948 i 72 km di costa hanno avuto un incremento complessivo pari a 550225,54 m^2 di spiaggia emersa, 6 u.f. hanno avuto un aumento molto significativo, mentre le zone in erosione sono di gran lunga minori, l'unica che in questo periodo ha subito un erosione significativa è l'u.f. 4, che va dal porto di Civitanova al fiume Chienti, che al netto dei soli 2 km totali di lunghezza ha avuto una perdita di 116038,77 m^2 di spiaggia emersa.

In questo periodo vi è stata la costruzione di 2 porti, a Civitanova Marche, tra le unità fisiografiche 3 e 4 e San benedetto del Tronto tra le unità fisiografiche 9 e 10. Proprio nella zona di Civitanova Marche i lavori per il porto sono iniziati nel 1919 con una barriera foranea distaccata

Tabella 1.

1894-1948	Superficie (m^2)	lunghezza (m)	Anni	m^2/anno	m/anno
uf.1	-10500,71	4000	54	-194,46	-0,049
uf.2	40310,70	6000	54	746,49	0,124
uf.3	-16811,91	12800	54	-311,33	-0,024
uf.4	-116038,77	1800	54	-2148,87	-1,194
uf.5	151140,26	7200	54	2798,89	0,389
uf.6	213489,64	7600	54	3953,51	0,520
uf.7	-41101,28	7000	54	-761,13	-0,109
uf.8	197478,78	13800	54	3657,01	0,265
uf.9	134726,65	2200	54	2494,94	1,134
uf.10	-2467,82	6400	54	-45,70	-0,007
TOT	**550225,54**				

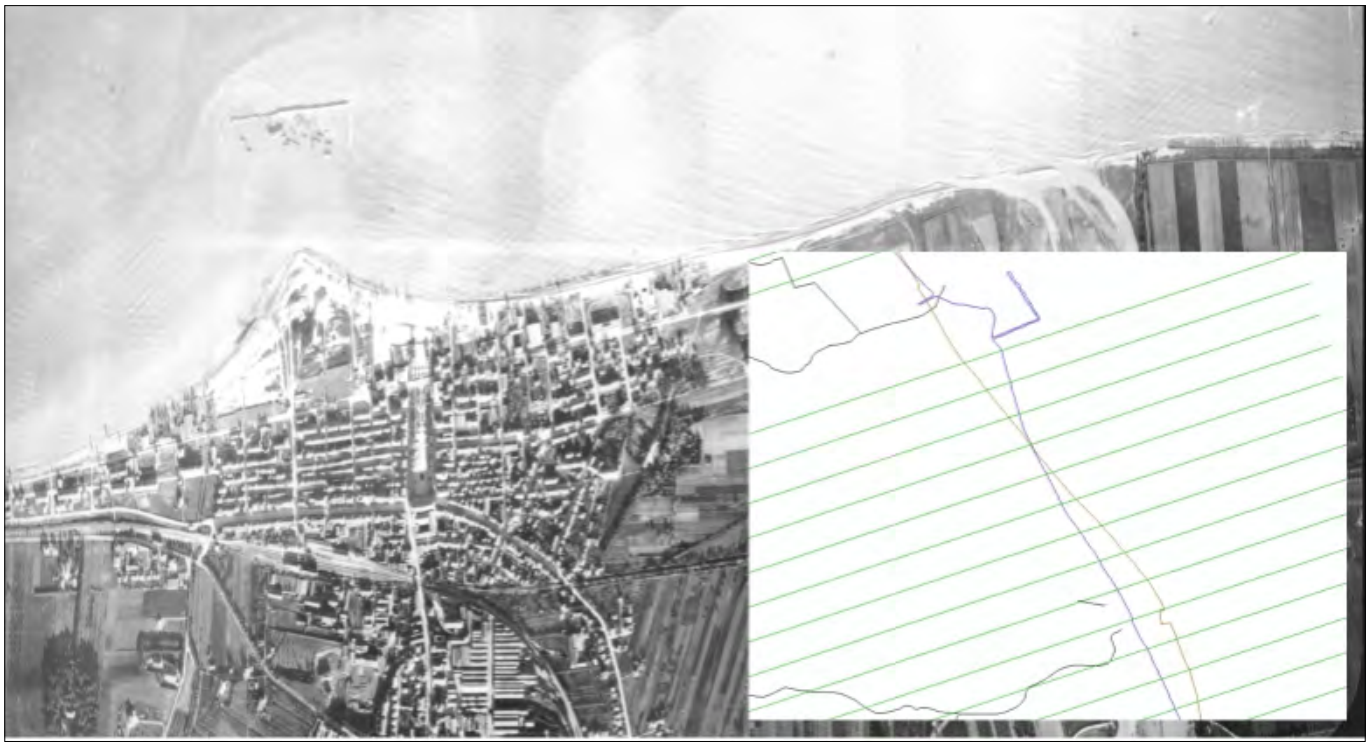


Figura 8. Foto di Civitanova Marche del 1943 (Acciarri – 2016), nel riquadro la linea marrone rappresenta la linea di riva del 1894, mentre la linea blu quella del 1948.

circa 400 metri dalla riva per facilitare l'approdo delle imbarcazioni da pesca, ma questa enorme barriera distaccata formò negli anni '30 e '40 un grosso tombolo retrostante che è stato smantellato per favorire la costruzione di un molo che congiungeva la diga alla riva.

Come si vede inoltre nell'immagine (Fig. 8), l'erosione è dovuta all'arretramento della foce del fiume Chienti, la spiaggia persa è proprio quella prossima alla foce, mentre grazie all'effetto della barriera prima e del molo poi, nella parte più settentrionale dell'u.f. la linea di riva è in avanzamento.

Un caso analogo di arretramento di foce fluviale coinvolge il fiume Tronto, che chiude l'u.f. 10 e segna il confine meridionale della regione. Quest'ultima parte dell'u.f. 10, che sono circa 1.8 km, è nota come Riserva Naturale della Sentina, ed è in forte erosione da molti anni, verrà fatto un focus proprio di questa zona in seguito.

Le opere di difesa costruite fino al 1948 sono state poche o assenti, eccezion fatta per la difesa aderente che protegge la ferrovia adriatica laddove essa transita in prossimità della costa (Tab. 2).

Il periodo 1948-1988 segna un trend diametralmente opposto, tutto il settore è in forte erosione, con oltre 850000 m2 di spiaggia persa con oltre 63 km di litorale dove si riscontra riduzione dell'arenile, solo la zona sopraflutto al porto di Numana (u.f.) e al porto di Civitanova (u.f. 4) sono in avanzamento.

L'erosione che ha coinvolto praticamente tutta la costa marchigiana fino agli anni '80 ha portato gli enti locali e regionali ad intervenire con opere di difesa di vario genere, soprattutto pennelli e barriere emerse parallele. Le prime opere sono state costruite a partire dagli anni '60 nelle varie unità fisiografiche, ma erano opere sparse, volte a impedire erosioni locali, in ambienti molto ristretti, che però hanno prodotto l'effetto opposto, hanno favorito la riduzione dell'arenile.

Solo con un grande piano progettuale risalente ai primi anni '80 sono state costruite nuove opere, su scala regionale, di modo che potessero avere effetti positivi su più ampie zone di litorale. I lavori si protrassero fino al 1985.

Ad esempio le opere delle unità fisiografiche 3 e 6 sono state ideate per contrastare l'erosione nel lato nord, quello sottoflutto ai 2 porti, che in questo periodo sono in arretramento.

L'u.f. 5 non è difesa con alcuna barriera parallela emersa, ma proprio negli ultimi anni di questo intervallo di tempo è stato effettuato un lavoro di ripascimento protetto da una barriera soffolta collegata a riva da due pennelli, uno

Tabella 2.

1948-1988	Superficie (m^2)	lunghezza (m)	Anni	m^2/anno	m/anno
uf.1	11653,58	4000	50	233,07	0,058
uf.2	-149415,44	6000	50	-2988,31	-0,498
uf.3	-154157,19	12800	50	-3083,14	-0,241
uf.4	44352,97	1800	50	887,06	0,493
uf.5	-236432,91	7200	50	-4728,66	-0,657
uf.6	-71752,49	7600	50	-1435,05	-0,189
uf.7	-166734,51	7000	50	-3334,69	-0,476
uf.8	-107955,94	13800	50	-2159,12	-0,156
uf.9	-97,35	2200	50	-1,95	-0,001
uf.10	-20543,32	6400	50	-410,87	-0,064
TOT	**-851082,60**				

Tabella 3.

1988-1999	Superficie (m^2)	lunghezza (m)	Anni	m^2/anno	m/anno
uf.1	-6815,77	4000	11	-619,62	-0,155
uf.2	10533,17	6000	11	957,56	0,160
uf.3	138230,17	12800	11	12566,38	0,982
uf.4	8527,43	1800	11	775,22	0,431
uf.5	-44778,89	7200	11	-4070,81	-0,565
uf.6	120954,89	7600	11	10995,90	1,447
uf.7	-23792,39	7000	11	-2162,94	-0,309
uf.8	67189,66	13800	11	6108,15	0,443
uf.9	5802,51	2200	11	527,50	0,240
uf.10	-432,64	6400	11	-39,33	-0,006
TOT	**275418,14**				

emerso e l'altro sommerso, gli effetti del ripascimento sono stati modesti, mentre l'effetto dell'opera antropica verrà valutato nel prossimo step 1999-1988.

L'u.f. 10, che comprende il comune di San Benedetto del Tronto, ha avuto uno sviluppo differente, con la costruzione delle proprie barriere secondo un progetto diverso, nel giro di 20 anni, tra il '60 e l'80, è stata costruita una serie di barriere lunghe 4.5 km, partendo con la costruzione della zona più meridionale di questi 4.5 km e via via costruendo nuove opere procedendo verso nord fino a giungere al porto. Le opere sono state risistemate prima nel 1982 e poi nel 2011.

Inoltre nel 1984 a Porto San Giorgio, tra l'u.f. 6 e l'u.f. 7, è stato finito il porto turistico, così da far arrivare a 4 i porti della zona.

Il periodo sopra riportato, che termina al 1999 mostra come le prime 2 u.f. siano praticamente stabili, con tassi di erosione e/o di avanzamento della linea di riva molto bassi.

Diametralmente opposto al periodo '48-'88 dove si riscontrava una perdita di oltre 50.000 m^2, in questo periodo l'unità fisiografica 3 ha un guadagno di spiaggia emersa di circa 140.000 m^2, l'impatto delle difese parallele inizia ad essere efficace, con un avanzamento evidente della linea di riva, di quasi un m ogni anno. Lo stesso risultato lo danno anche le barriere parallele presenti nell'u.f. 6, costruite con lo stesso principio, ossia impedire l'erosione sottoflutto al porto, favorendo anche l'avanzamento della linea di riva, quasi 1.5 m all'anno.

L'unità 4 è sempre in leggero avanzamento, mentre l'unità 5 sempre in erosione, e dimostra il fatto che il sistema composto da una barriera soffolta collegata a riva da due pennelli ideata nel 1985 non è efficace. L'unita 7 invece, protetta con per il primo tratto con un pennello e una barriera soffolta, per l'ultimo tratto con barriere emerse, le risposte che queste diverse modalità di difesa sono differenti, la parte settentrionale, che è il lato sopraflutto al porto, c'è accumulo nei primi metri, ma poi l'area è sostanzialmente in erosione, poiché l'opera soffolta non contrasta efficacemente l'azione dei movimenti del mare. La zona sud invece protetta con opere emerse ha una risposta differente, più efficace, con l'accumulo di materiale nelle zone retrostanti le barriere.

L'unita fisiografica 8, che è difesa con una lunga fila di barriere emerse ha la stessa risposta che le barriere svolgono nelle u.f. 3 e 6, anche se con risultati meno significativa, qui la linea di riva avanza mediamente di 0.45 m ogni anno.

Tabella 4.

1999-2010	Superficie (m^2)	lunghezza (m)	Anni	m^2/anno	m/anno
uf.1	19867,92	4000	11	1806,17	0,452
uf.2	-8786,16	6000	11	-798,74	-0,133
uf.3	3286,95	12800	11	298,81	0,023
uf.4	30471,22	1800	11	2770,11	1,539
uf.5	256,26	7200	11	23,30	0,003
uf.6	42013,00	7600	11	3819,36	0,503
uf.7	20108,15	7000	11	1828,01	0,261
uf.8	23024,15	13800	11	2093,10	0,152
uf.9	22040,14	2200	11	2003,65	0,911
uf.10	-51831,54	6400	11	-4711,96	-0,736
TOT	**100450,09**				

Le unità 9 e 10 sono sostanzialmente in equilibrio, per stabilizzare ulteriormente la zona 9 sono state costruite 2 barriere sommerse, ai due lati di un pennello.

Nel periodo 1999-2010 ci sono stati lavori di manutenzione delle opere presenti e alcuni nuovi interventi come la costruzione di un pennello nel comune di Porto Sant'Elpidio (u.f. 5) e il più importante intervento di ripascimento mai effettuato nella zona, esso è stato effettuato con le sabbie relitte del fondale che sono state dragate e riversate sulla spiaggia emersa, in un progetto finanziato dalla Regione Marche.

La zona nord nei primi anni 2000 entra in erosione, e per questo viene effettuato un ripascimento sempre all'interno dello stesso finanziamento di cui sopra, con la differenze che in questo tratto vengono usate materiali di cava, questo intervento risale al 2009.

La zona 2 è in leggera erosione, mentre tutte le altre sono stabili o in avanzamento.

Nella zona 5 nel 2005 viene costruito un pennello nella parte più settentrionale dell'unità fisiografica che risulterà dannoso sin dai primi anni, come si vedrà nel prossimo step e soprattutto da un focus effettuato proprio nella zona di tale opera. Viene inoltre effettuata la modifica dell'opera soffolta già presente, con l'aggiunta di un piccolo ripascimento, che ha permesso di guadagnare una piccola superficie di spiaggia emersa, pari circa 13.000 m^2.

L'unità 6 continua ad essere in avanzamento grazie alla lunga serie di barriere emerse, così come l'unità 8, con avanzamenti medi della linea di riva rispettivamente di 0.5 e 0.15 m ogni anno.

L'u.f. 7 invece, come già visto in precedenza ha subito un intervento di ripascimento con circa 85000 m^3 di sabbie

dragate al largo, molto differenti rispetto al materiale nativo, sia come colore che come dimensione dei granuli, che hanno permesso di guadagnare quasi 10.000 m^2 di spiaggia emersa. Inoltre, anche le unità 8 e 9 sono state interessante dal ripascimento di cui sopra, che è stato molto mirato ad aumentare la superficie di spiaggia emersa di precise porzioni di litorale in cui le difese non svolgevano la funzione per cui erano state pensate.

L'unità fisiografica 8 è stata interessata da alcuni interventi come la costruzione del piccolo porticciolo di Pedaso, che a differenza degli altri porti del litorale, è aperto a sud ed essendo il flusso da sud a nord è spesso soggetto ad insabbiamento, la sabbia viene infatti dragata e riversata nella spiaggia sommersa dell'abitato di Pedaso. L'arenile di Pedaso è molto scarso e quindi poco fruibile, le opere presenti, pennelli e barriere emerse, fungono solo da mantenimento della poca spiaggia rimasta.

L'unità 9 è in avanzamento, mentre la zona 10 è in erosione poiché risente sempre dell'arretramento della linea di riva nella zona della Riserva della Sentina (Tab. 5).

Nell'intervallo 2010-2020 non ci sono state grosse variazione di opere, eccezion fatta per la manutenzione ordinaria, anche se nel 2018 è stato approvato dalla Regione il nuovo Piano GIZC, con alcuni lavori iniziati tra il 2019 e il 2020 come la prosecuzione verso nord di barriere parallele presente nella parte più settentrionale dell'u.f. 3 e la rimozione e sistemazione delle barriere dell'u.f. 7.

La zona risulta complessivamente in avanzamento con tassi anche superiori ai 10 anni precedenti (Tab. 6).

Volendo fare una panoramica generale dell'intero tratto in 126 anni, si può osservare come la zona sia complessivamente in avanzamento, con alcune aree però soggette ad erosione, come l'unità fisiografica 2 nel comune di Porto Recanati, difesa con molteplici tipologie di opere, ma poco efficaci, la zona 4, anche se in questo preciso caso c'è da fare attenzione come la zona fosse in forte erosione prima della costruzione del porto di Civitanova, terminata negli anni '40, infatti confrontando le linee di riva del 1948 e del 1894 l'erosione era pari a -116038,77. Dal 1984 ad oggi l'intera area è sempre stata in avanzamento con una superficie di 81675,13 m^2 guadagnati.

Le zone 5 e 7 sono in erosione, mentre le opere messe in campo nelle unità 6 e 8 hanno favorito la sedimentazione della spiaggia emersa.

Tabella 5.

2010-2020	Superficie (m^2)	lunghezza (m)	Anni	m^2/anno	m/anno
uf.1	-11847,43	4000	10	-1184,74	-0,296
uf.2	3785,88	6000	10	378,59	0,063
uf.3	69570,86	12800	10	6957,09	0,544
uf.4	-1676,49	1800	10	-167,65	-0,093
uf.5	8474,78	7200	10	847,48	0,118
uf.6	19388,53	7600	10	1938,85	0,255
uf.7	-4578,27	7000	10	-457,83	-0,065
uf.8	81772,32	13800	10	8177,23	0,593
uf.9	22189,83	2200	10	2218,98	1,009
uf.10	7332,87	6400	10	733,29	0,115
TOT	**194412,87**				

Tabella 6.

1894-2020	Superficie (m^2)	lunghezza (m)	Anni	m^2/anno	m/anno
uf.1	2357,59	4000	126	18,71	0,005
uf.2	-103571,86	6000	126	-822,00	-0,137
uf.3	40118,87	12800	126	318,40	0,025
uf.4	-34363,64	1800	126	-272,73	-0,152
uf.5	-121340,49	7200	126	-963,02	-0,134
uf.6	324093,57	7600	126	2572,17	0,338
uf.7	-216098,30	7000	126	-1715,07	-0,245
uf.8	261508,97	13800	126	2075,47	0,150
uf.9	184661,78	2200	126	1465,57	0,666
uf.10	-67942,45	6400	126	-539,23	-0,084
TOT	**269424,03**				

L'unità 9 è in avanzamento, poiché essendo compresa tra la foce del Tesino a nord e il porto di San Benedetto del Tronto a sud, ed essendo il flusso sedimentario in questo tratto verso sud, la costruzione del porto ha favorito l'accumulo della spiaggia nel lato nord del porto. L'u.f. 10 è in erosione, anche se vedremo in seguito alcune anomalie all'interno di essa.

Si può notare come l'u.f. 1 sia stabile anche senza la costruzione di opere poiché essendo compresa tra il porto di Numana a nord e la foce del Musone a sud ed essendo il flusso lungo costa in direzione nord, la spiaggia è in equilibrio grazie all'apporto sedimentario fluviale; analoga è la situazione della zona 4, compresa tra il fiume Chienti e porto di Civitanova, questa essendo più breve, solo 2 km, il

Tabella 7.

1894-1988	Superficie (m^2)	lunghezza (m)	Anni	m^2/anno	m/anno
uf.1	1152,868	4000	94	12,265	0,003
uf.2	-109104,745	6000	94	-1160,689	-0,193
uf.3	-170969,105	12800	94	-1818,820	-0,142
uf.4	-71685,799	1800	94	-762,615	-0,424
uf.5	-85292,652	7200	94	-907,369	-0,126
uf.6	141737,149	7600	94	1507,842	0,198
uf.7	-207835,789	7000	94	-2211,019	-0,316
uf.8	89522,843	13800	94	952,371	0,069
uf.9	134629,301	2200	94	1432,227	0,651
uf.10	-23011,138	6400	94	-244,799	-0,038
TOT	**-300857,07**				

È più interessante osservare prima l'intervallo 1894-1988 e poi l'intervallo 1988-2020, poiché è proprio dopo il periodo 1980-1985 che nell'intero litorale sono state costruite le opere di difesa tutt'oggi presenti, salvo rari nuovi interventi e manutenzione di opere già esistenti (cfr. Tab. 7).

Prima del 1988 il litorale era in forte erosione con una superficie persa di spiaggia emersa di oltre 300.000 m^2 ed oltre 45 km di costa in erosione (Tab. 8).

Dopo il 1988 la situazione è opposta, dopo l'intervento antropico il litorale è nel suo complesso in avanzamento, con una superficie di spiaggia guadagnata di oltre 570.000 m^2, con 7 unità fisiografiche in avanzamento che corrispondono ad oltre 50 km.

materiale accumulato sopraflutto al molo la rende addirittura in avanzamento, anche senza nessuna opera costruita.

L'unità 2 è stabile grazie all'intervento antropico, sono infatti tantissime le difese artificiali presenti, la terza u.f. è in sedimentazione per merito delle barriere distaccate parallele, stesso andamento per le unità 6 e 8. Le u.f. 5 e 7 sono invece in erosione, anche se con tassi differenti, a dimostrazione che le opere sommerse presenti nelle 2 zone non danno gli stessi effetti delle barriere emerse. L'unità 9 è in avanzamento per i motivi già ampiamente elencati; mentre la zona 10 è in erosione.

Nella descrizione precedente sono stati citati due approfondimenti che riguardano la parte settentrionale dell'unità fisiografica 5 e la parte meridionale dell'unità 10.

Tabella 8.

1988-2020	Superficie (m^2)	lunghezza (m)	Anni	m^2/anno	m/anno
uf.1	1204,72	4000	32	37,65	0,009
uf.2	5532,89	6000	32	172,90	0,029
uf.3	211087,97	12800	32	6596,50	0,515
uf.4	37322,16	1800	32	1166,32	0,648
uf.5	-36047,84	7200	32	-1126,50	-0,156
uf.6	182356,42	7600	32	5698,64	0,750
uf.7	-8262,51	7000	32	-258,20	-0,037
uf.8	171986,13	13800	32	5374,57	0,389
uf.9	50032,48	2200	32	1563,51	0,711
uf.10	-44931,32	6400	32	-1404,10	-0,219
TOT	**570281,10**				

Il primo dimostra come un'opera di difesa possa causare molti più danni che benefici nel tratto in cui viene realizzata: è il caso di un pennello costruito nel 2005, per ampliare la spiaggia antistante un camping nel comune di Porto Sant'Elpidio. (Fig. 9). L'immagine mette in evidenza come il litorale, nel 1999, prima della costruzione del pennello fosse perfettamente rettilineo (linea gialla), mentre già pochi anni dopo la realizzazione dell'opera, ai due lati della stessa c'è uno squilibrio molto evidente, linee verde e azzurra. Il lato sud, cosiddetto sopraflutto è in leggero avanzamento, poiché il flusso sedimentario che è in direzione sud-nord è intercettato dall'opera e favorisce l'accumulo di materiale, a discapito però del lato sottoflutto al pennello, che non viene raggiunto dal materiale che viaggia lungo costa e che quindi è sottoposto a rapido arretramento.

Volendo quantificare il materiale perso e quello guadagnato (Tab. 9) si può dire che a parità di lunghezza del settore, circa 800 metri ai due lati dell'opera, la zona nord ha perso in 20 anni una superficie di spiaggia di circa 40'000 m^2 con arretramento della linea di riva di oltre 2 m ogni anno, di certo non bilanciati dalla la zona a sud, che ha guadagnato meno di 10'000 m^2 di spiaggia emersa, con avanzamento di poco più di mezzo metro ogni anno.

Il secondo esempio, invece riguarda un'area totalmente diversa e priva di opere di difesa, la Riserva Naturale Regionale della Sentina, nel comune di San Benedetto del Tronto, negli ultimi 1,8 km della regione (Fig. 10).

L'immagine mostra chiaramente come il tratto antistante la spiaggia non presenti opere antropiche, che terminano proprio a nord, mentre a sud troviamo il fiume Tronto che presenta due moli guardiani ai suoi due lati, il più lungo dei quali, costruito all'estremo settentrionale del territorio abruzzese, intercetta la deriva dei sedimenti da sud.

Le linee di riva tracciate ci mostrano come l'erosione

Tabella 9. Variazioni intervenute ai lati del pennello costruito a Porto Sant'Elpidio

1999-2020	Superficie (m^2)	lunghezza (m)	Anni	m^2/anno	m/anno
sommatoria zona	-27044,765	1600	21	-1287,846	-0,805
zona sottoflutto	-38016,724	800	21	-1810,320	-2,263
zona sopraflutto	9538,555	800	21	454,217	0,568

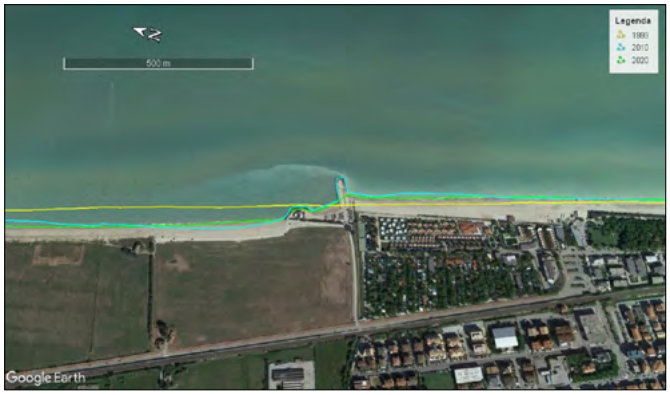


FIGURA. 9. Evoluzione della linea di riva prima e dopo la costruzione del pennello.

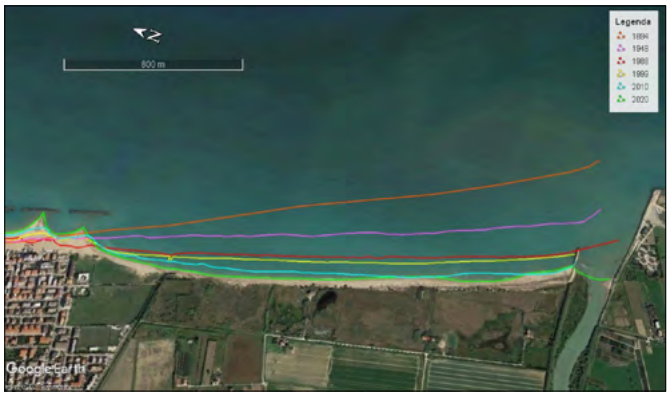


FIGURA. 10. Evoluzione della linea di riva della Riserva della Sentina.

di questa porzione di costa sia costante praticamente da 126 anni, ogni linea di riva è sempre più arretrata di quella precedente (Tab. 10)

Il presente tratto di costa ha perso, per una lunghezza di 1,8 km circa, quasi 450'000 m^2 di spiaggia emersa negli ultimi 126 anni, con un arretramento di quasi 2 m ogni anno e quasi 100'000 m^2 solo negli ultimi 20 anni, quasi 2,5 m ogni anno, per un arretramento della linea di riva vicino alla foce di oltre 350 m.

L'erosione complessiva dell'unità fisiografica 10 nei vari intervalli di anni visti in precedenza è dovuta proprio a questo ultimo tratto di costa.

RISULTATI DEL CAMPIONAMENTO SEDIMENTOLOGICO

L'analisi granulometrica ha permesso lo studio delle variazioni sedimentologiche della spiaggia emersa del litorale marchigiano meridionale.

Sono state calcolate le distanze lungo riva che intercorrono fra i punti di prelievo, sia come distanze parziali che distanze progressive, così da facilitare la creazione di grafici, in particolare quello della Media (Mz), aggiungendo le foci dei fiumi e le opere antropiche. Dallo studio di questi grafici è derivata un'analisi di come il trasporto litoraneo, le foci fluviali e le opere di difesa influenzano la sedimentologia della costa marchigiana (Fig. 11).

Tabella 10. Variazioni intervenute lungo il litorale della Riserva della Sentina

Periodo	Superficie (m^2)	lunghezza (m)	Anni	m^2/anno	m/anno
2020-1894	-443070,823	1800	126	-3516,435	-1,954
1999-2020	-92756,909	1800	21	-4416,9957	-2,454

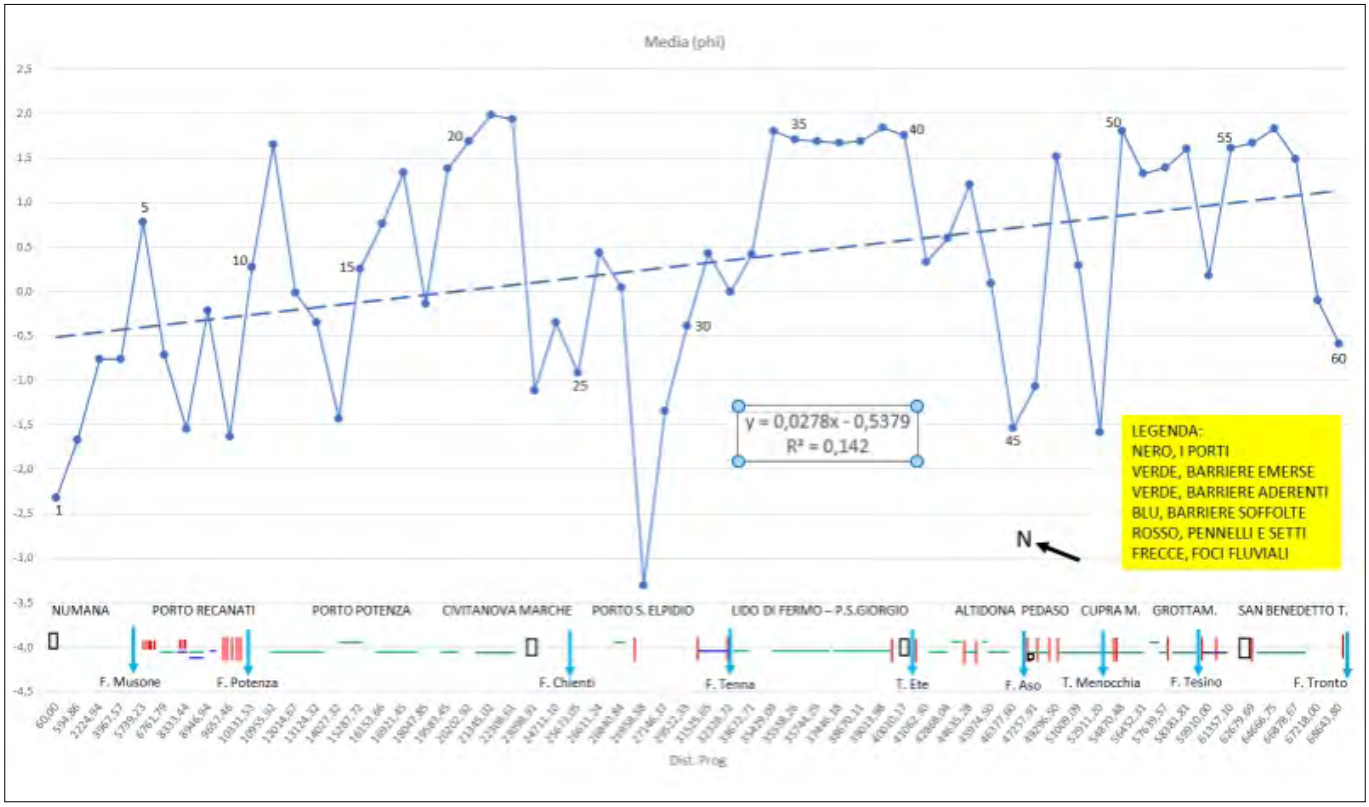


Figura. 11. Grafico delle medie granulometriche dei sedimenti di battigia.

Si osserva che la granulometria media tende a diminuire andando verso sud, in primis perché la zona sud è caratterizzata da un maggior numero di opere di difesa, soprattutto difese parallele, che tendono a difendere maggiormente l'area retrostante, formando spiagge con sabbie medio-fini.

Altro fattore importante è l'incidenza dei fiumi, i primi 30 km dove sono stati prelevati i primi 30 campioni, sono caratterizzati solo da 3 fiumi, il Musone, il Potenza e il Chienti, che hanno il proprio bacino idrografico nei Calcari della Successione Marchigiana e portano al mare soprattutto ghiaia medio-fine o sabbie grossolane.

Dopo il campione 30 c'è un cambiamento, i fiumi più meridionali iniziano ad erodere non solo i calcari, ma anche le formazioni terrigene della Laga, e tendono quindi a far arrivare al mare materiale più fine.

Due casi particolari riguardano i fiumi Menocchia e Tesino, che sono soggetti frequentemente alle piene, accumulando materiale grossolano nelle zone prossime alle foci come si vede dai campioni 49 e 54 che sono più grossolani dei campioni delle zone vicine. Diverso ancora è il discorso per il fiume Tronto, che ha il suo bacino idrografico nella formazione della Laga e nelle aree argillose dell'ascolano, e tende quindi a far arrivare al mare anche materiale più fine.

Osservando e confrontando l'analisi granulometrica e quella morfologica e analizzando due studi presentati ai Comuni di Altidona (campioni 43 – 45) e Cupra Marittima (campioni 48 – 50) per una modifica delle opere di difesa costiera che avverrà nel 2021, è stata individuata una zona di divergenza di flusso. Le analisi relative a tali Comuni, distanti appena 8 km tra di loro, dimostrano che il flusso sedimentario lungo costa ad Altidona, il Comune più settentrionale, è prevalente verso nord di 12'000 m^3 l'anno; mentre a Cupra Marittima il flusso sedimentario è verso sud di 3'000 m^3 l'anno. Si potrebbe quindi ipotizzare che negli ultimi 15 km della regione Marche localmente il flusso sia prevalentemente in direzione nord–sud, anche se tale ipotesi andrebbe verificata anche con modelli matematici dettagliati.

ANALISI DEL COLORE

Per l'analisi colorimetrica sono stati prelevati altri 60 campioni, classificati con il sistema CIEL*a*b*. (Fig. 12).

L'analisi è stata effettuata mediante l'uso del colorimetro; ogni campione è stato sottoposto a 10 misurazioni e mediante il software collegato ad esso ne è stata presa la media per i 3 parametri che il colorimetro restituisce: L*, a*, b*: dove L* indica la luminosità, a* indica l'intervallo tra il rosso (a* positivo) e il verde (a* negativo), b* indica l'intervallo tra il giallo (b* positivo) e il blu (b* negativo).

L'analisi del colore è stata studiata valutando i grafici lungo-costa dei 3 parametri: L*, a*, b*. (Fig. 13). Nei seguenti grafici, in asse x c'è il numero del campione, in asse y la scala verticale dei valori dei rispettivi parametri.

Il parametro L*, ha un andamento molto altalenante, non è stato considerato significativo.

Mentre i parametri a* e b* risultano più interessanti: osservando il grafico del parametro a* si vede che i valori più alti si riscontrano nei primi 20 campioni, questo può dipendere dal fatto che i 2 fiumi di questa zona (Musone e Potenza) hanno buona parte del proprio bacino idrografico nella Scaglia Rossa, quindi la maggior percentuale di rosso potrebbe esser dovuta a questo fattore. Procedendo verso sud i valori sono più bassi e questo può essere spiegato dal fatto che i fiumi che si susseguono, trasportano al mare sedimenti di formazioni anche più terrigene come le Arenarie della Laga, che risultano meno rosse.

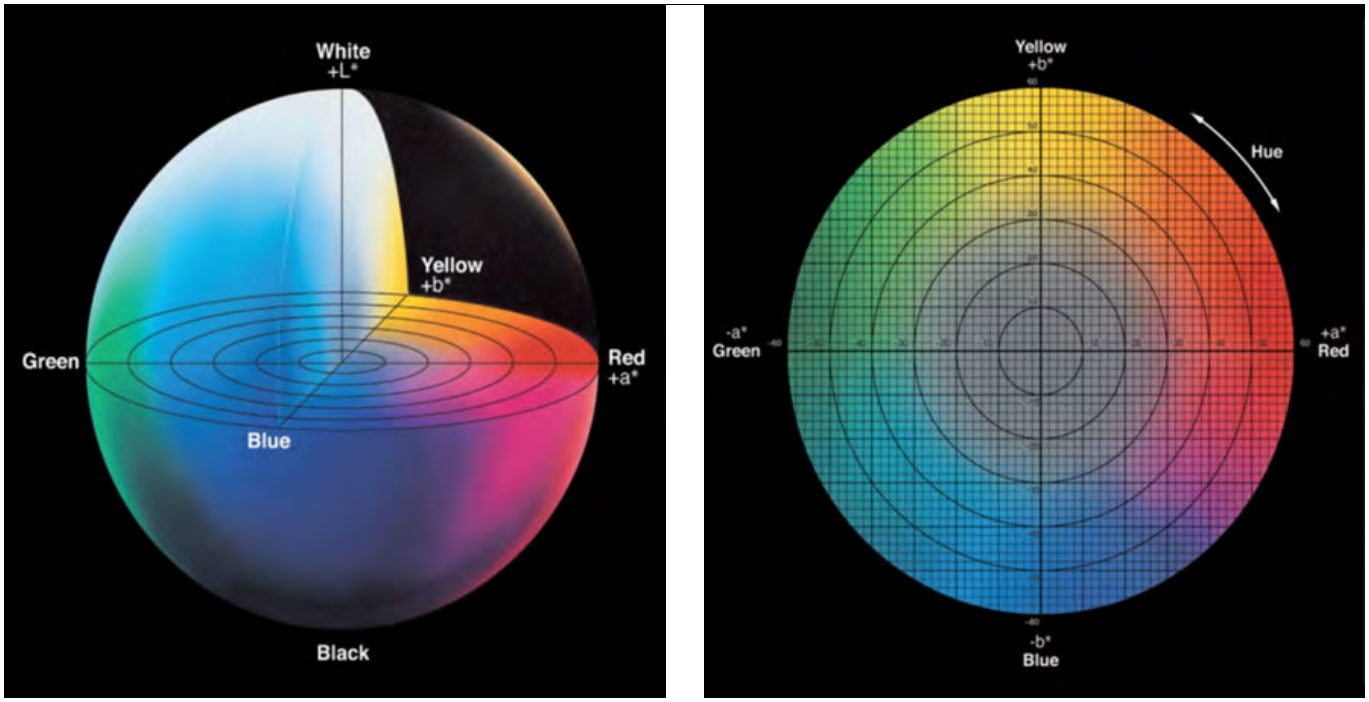


Figura. 12. Lo spazio CIEL*a*b* e il diagramma di Cromaticità a*,b* (foto Pranzini, studi costieri).

Il parametro b* ha un andamento anch'esso altalenante con valori compresi tra 15 e 7 con una tendenza in diminuzione verso sud.

Anche qui possiamo notare che i primi 18-20 campioni sono quelli con i valori più alti, tutti sopra 12, mentre le zona centrale presenta i valori più bassi. Si può notare, però come ci sia un innalzamento dei valori tra i campioni 50 e 57, questo potrebbe esser dovuto alle formazioni argillose presenti nella zone retrostanti questo tratto di litorale, che vengono trasportate al mare dai fiumi Tesino e Tronto, infatti la zona è ricca di calanchi ed è presente il Monte Ascensione, caratterizzato solo da formazioni argillose, che possono restituire, in particolare nelle zone con granulometria più fine questo colore più giallastro.

L'analisi del colore ha inoltre permesso un confronto da un punto di vista cromatico dell'impatto che hanno avuto i ripascimenti artificiali nel tratto di costa in esame; il più importante che ha interessato l'intero litorale marchigiano è stato effettuato nel 2007-2008 con circa 85000 mc di sabbie prelevate al largo, che come già detto in precedenza altro non sono che le spiagge del paleopò.

Come si vede già dall'immagine di Google Earth della spiaggia di Marina Palmense (FM), i colori sono molto differenti, la sabbia usata è di colore grigiastro rispetto al campione nativo. (Fig. 14)

Per questo si è preso uno studio del 2007 dove si confrontava il colore della sabbia usata nel ripascimento, con il campione nativo e questi valori sono stati confrontati con quelli del campione da me prelevato per questo lavoro di tesi.

Si può vedere dalle Tabb. 11 e 12 come i 3 parametri siano ben diversi l'uno dall'altro, il campione usato per il ripascimento era ben diverso come colorazione dal mate-

Tabella 11. Confronto dei parametri colorimetrici

	Parametro L	Parametro a*	Parametro b*
Campione nativo prelevato nel 2007	58.05	3.43	14.24
Campione usato per il ripascimento 2007	52.21	0.23	5.56
Campione prelevato nel 2020 per la tesi	62.55	2.19	8.65

Tabelle12a Confronto dei parametri colorimetrici

	ΔL	Δa*	Δb*
Campione nativo 2007 Campione ripascimento 2007	-5.84	-3.20	-8.68
Campione tesi 2020 Campione nativo 2020	4.50	-1.24	-5.59
Campione tesi 2020 Campione ripascimento 2007	10.34	1.96	3.09

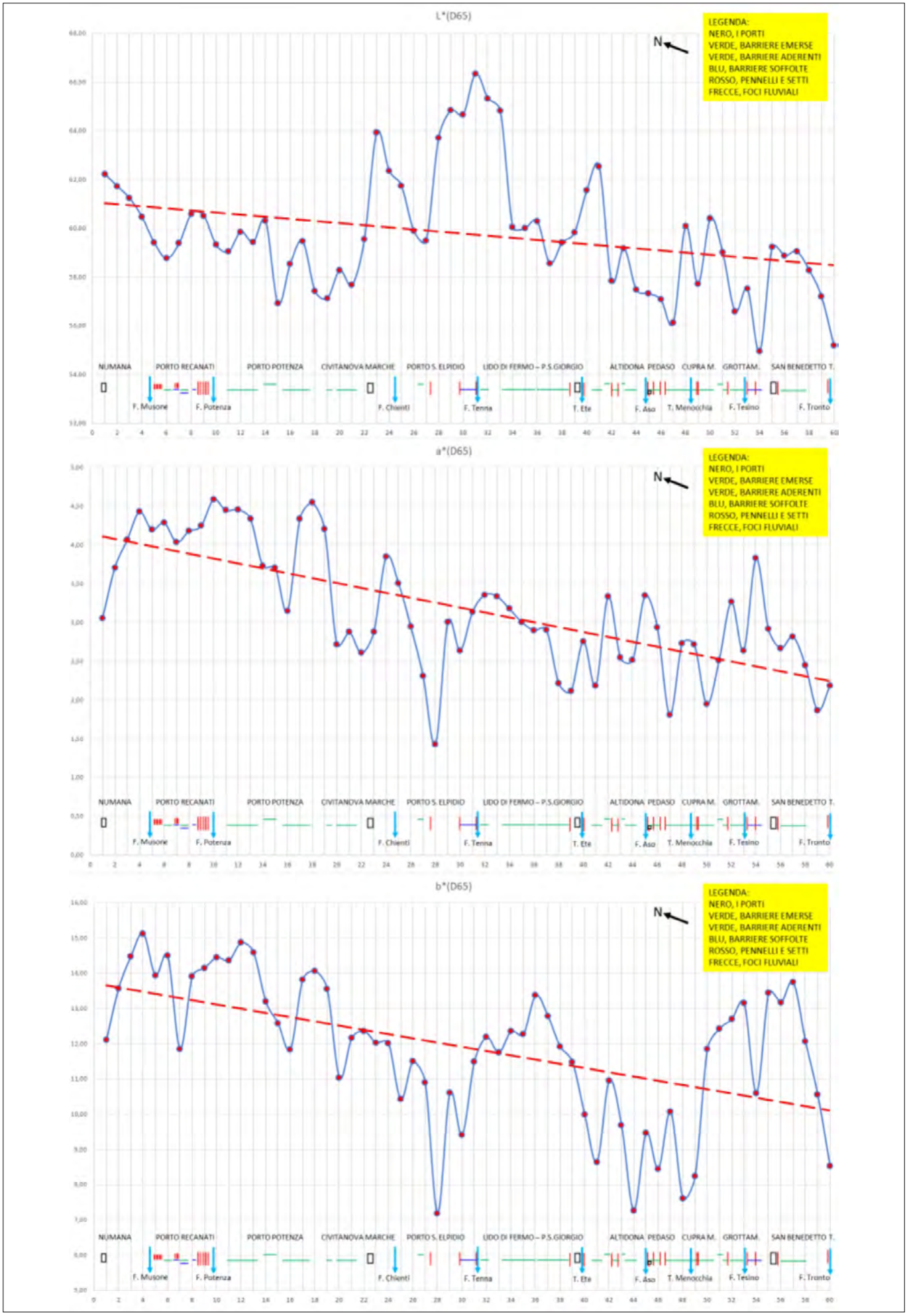


Figura. 13. Grafici lungo-costa dei parametri L, a*, b*.

Figura. 14. Punto di prelievo del campione nativo di studio

riale nativo con una differenza di Luminosità pari a (ΔL^* = -5.84), con inoltre un (Δa^* = -3,20) e un (Δb^* = -8.68).

Le sabbie utilizzate per il ripascimento del 2007 sono quindi più scure e con tonalità tendenti al ciano rispetto ai sedimenti originari.

Le sabbie attuali invece sono più luminose rispetto al campione naturale del 2007 (ΔL^* = 4.50), presentano però coordinate cromatiche negative (Δa^* = -1.24 e Δb^* = -5.59) con tonalità anch'esse tendenti al ciano.

Le differenze invece tra il campione odierno e quello del ripascimento sono (ΔL^* = 10.34) con coordinate cromatiche (Δa^* = 1.96 e Δb^* = 3.09).

I campioni risultano tutti e 3 diversi, anche se i valori odierni di a* e b* risultano più bassi rispetto a prima del ripascimento, il che può significare che i sedimenti versati nel 2007 abbiano reso più scura e tendente al ciano la colorazione dell'arenile, anche se la luminosità è aumentata rispetto a 14 anni fa.

CONCLUSIONI

La crescita del valore economico, oltre che ambientale, della spiaggia in termini turistico-balneari specialmente negli ultimi anni, ha portato a cercare di far accrescere il più possibile gli arenili della riviera adriatica, rendendoli sempre più ampi e fruibili. A tal fine si deve cercare di ridurre al minimo l'erosione costiera e, quando la natura da sola non riesce a contrastare questo evento, è possibile intervenire antropicamente costruendo opere di difesa o effettuando ripascimenti artificiali.

Lo scopo di questo lavoro è appunto valutare l'impatto che le opere antropiche hanno e hanno avuto sul litorale marchigiano a sud del promontorio del Conero, nel corso degli anni.

Si è visto che rispetto al 1894 oltre 42 km di litorale siano complessivamente in avanzamento, principalmente in conseguenza delle opere di difesa e in particolare delle barriere distaccate parallele, mentre sono in erosione le unità fisiografiche difese con opere diverse (come le zone 5 e 7) o con opere troppo abbondanti, costruite senza pianificazione (come la zona 2).

Si è visto però come dal 1988 ad oggi, da quando le opere di difesa hanno assunto lo stato attuale, le spiagge siano praticamente tutte in avanzamento o stabili, le zone più in erosione sono le unità fisiografiche 5 e 10; infatti la zona 5, stabile fino al 2000, non è difesa da opere antropiche in grado di contrastare efficacemente il blocco di sedimenti operato dl pennello posto sulla sponda nord del fiume Tenna (la barriera soffolta si è infatti rivelata del tutto inutile); in più, con la costruzione nel 2005 di un pennello (caso analizzato in precedenza) l'erosione è aumentata.

Dall'analisi granulometrica si evince come le spiagge delle singole unità fisiografiche siano differenti tra loro, con una tendenza ad avere granulometria più fine procedendo verso sud. Questo è dovuto a diversi fattori come la tipologia di materiale trasportato dai fiumi al mare, e quindi dal bacino di alimentazione e dalla lunghezza degli stessi.

Altro parametro importante è la tipologia e il numero di opere di difesa presenti, ad esempio le zone difese con barriere emerse parallele presentano spiagge con sabbia, mentre le zone non riparate o difese con pennelli o barriere sommerse, presentano mediamente granulometrie più grossolane.

Nel complesso, le opere presenti lungo gran parte del litorale marchigiano sono state progettate accuratamente, anche se troppo frequentemente, irrigidendo la costa e risultando impattanti da un punto di vista paesaggistico, con

chilometri di scogliere emerse parallele, che stanno avendo comunque risultati abbastanza buoni.

Al contempo però, stanno aumentando l'erosione nelle zone prive di difese, come si vede nelle zone in cui la ferrovia passa vicino alla linea di riva e soprattutto nella Riserva della Sentina, dove la spiaggia è in forte erosione. Proprio la Sentina è una delle due zone particolari osservate che hanno bisogno di urgenti interventi antropici come la costruzione di barriere associate magari ad interventi di ripascimento, per tornare ad avere dei tassi di accrescimento della spiaggia.

L'analisi dell'impatto delle difese sul paesaggio costiero, sulla riduzione della resilienza, sulla qualità delle acque e sulla sicurezza nella balneazione non è tra gli scopi del presente lavoro, ma non per questo deve essere considerato un aspetto secondario della gestione dell'erosione costiera.

Il presente studio offre una panoramica piuttosto ampia di come ha risposto il litorale marchigiano alla costruzione di opere di difesa e si presta per suggerire interventi mirati a migliorare sia piccole porzioni di litorale, con opere specifiche valide, sia intere unità fisiografiche o settori ancora più ampi, poiché si conosce l'evoluzione pregressa dei tratti di litorale studiati, almeno degli ultimi 126 anni e monitorando le variazioni spazio temporali future si può prevedere il suo trend evolutivo e individuare le migliori tipologie di opere necessarie.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (1990). *Atlante delle spiagge italiane*. SELCA srl, Firenze.

Acciarri A. (2010). *Le spiagge delle Marche Meridionali: analisi evolutiva del litorale fra Numana e San Benedetto del Tronto*. Univ. di Camerino, Tesi di Laurea Specialistica in Risorse e Rischi Geoambientali inedita. A.A. 2009-2010.

Acciarri A., Bisci C., Cantalamessa G., Di Pancrazio G., Spagnoli F. (2017). *Gli effetti antropici nell'evoluzione storica della costa Picena*. Studi Costieri, 24, 3-10.

Anfuso G., Bowman D., Danese C., Pranzini E. (2016). *Transect based analysis versus area based analysis to quantify shoreline displacement: spatial resolution issues*". Environ Monit Assess.

Aquater (1982). *Studio generale per la difesa delle coste: prima fase*. Rapporti di settore Regione Marche.

Beleggia M. (2018). *Monitoraggio e caratterizzazione sedimentologica della spiaggia emersa nel comune di Porto Sant'Elpidio (FM)*. Univ. di Camerino, Tesi di Laurea triennale in Scienze geologiche inedita, A.A. 2017-2018.

Bisci C., Cantalamessa G. (2008). *Analisi delle caratteristiche morfologiche e sedimentologiche del litorale di pertinenza della Riserva Naturale Regionale della Sentina e dei fondali ad esso antistanti entro le tre miglia nautiche.* Relazione tecnico scientifica ad uso della Riserva Naturale della Sentina, San Benedetto del Tronto.

Bisci C., Cantalamessa G., Baleani C. (2088). *Considerazioni sull'utilizzo delle sabbie dragate al largo di Civitanova Marche (Adriatico centrale) per il ripascimento delle spiagge*. Conf, "Costa, Prevenire, Programmare, Pianificare", Maratea. Aut. Di Bacino della Basilicata, Studi e Ricerche, 9.

Bisci C., Cantalamessa G., Spagnoli F., Tramontana M. (2021a). *Evoluzione storica e attuale del litorale delle Marche*. Studi Costieri, in stampa.

Bisci C., Cantalamessa G., Spagnoli F., Tramontana M. (2021b). *Caratteri oceanografici dell'Adriatico centro-settentrionale e della costa marchigiana*. Studi Costieri, in stampa.

CNR (1985). *Atlante delle spiagge italiane: dinamismo, tendenza evolutiva, opere umane*. S.E.L.C.A. s.r.l., Firenze.

Comune di Altidona (FM) (2019). *Progetto esecutivo per la realizzazione di opere di difesa costiera lungo il litorale del comune di Altidona (FM)*. Rapporto tecnico.

Comune di Cupra Marittima (AP). *Interventi per il miglioramento delle condizioni di sicurezza del litorale del comune di Cupra Marittima (AP)*. Rapporto tecnico.

Folk R.L., Ward W.C. (1957). *A study in the significance of grain-size parameters*. J. Sedim. Petrology, 27, 3-26.

Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero (2006). *Le spiagge delle Marche*. Studi Costieri, 10, 77–82.

Pranzini E. (1994). *Bilancio sedimentario ed evoluzione storica delle spiagge*. Il Quaternario, 7, 197-204.

Pranzini E. (1995). *Cause naturali ed antropiche nelle variazioni del bilancio sedimentario dei litorali*. Riv. Geogr. It., ns, 1, 47-62.

Pranzini E. (2004a). *Forma delle Coste - Geomorfologia Costiera Impatto Antropico e Difesa dei Litorali*. Casa Editrice Zanichelli.

Pranzini E. (2004b). *Caratteristiche morfologiche e sedimentologiche di una zona di convergenza del trasporto litoraneo (Versilia, Toscana)*. Studi Costieri, 8, 135 - 149.

Pranzini E., Cinelli I., Cipriani L.E., Anfuso G. (2019). *An Integrated Coastal Sediment Management Plan: The Example of the Tuscany Region (Italy)*.

Pranzini E., Simonetti D. (2008). *Beach evolution monitoring: Surface Variation Analysis vs Transept Based Analysis*. pp 25-31.

Regione Marche, Dipartimento Territorio e Ambiente (2005). *Piano di Gestione Integrata delle Aree Costiere*.

Regione Marche, Dipartimento Territorio e Ambiente (2010). *Piano di gestione integrata delle zone costiere*.

Regione Marche, Dipartimento Territorio e Ambiente (2018). *Piano di gestione integrata delle zone costiere (Piano GIZC)*.

Caratteri ambientali ed evoluzione recente del sito protetto della Palude di Torre Flavia (Lazio settentrionale)

The protected site of the Palude di Torre Flavia: environmental features and recent evolution (Northern Latium)

Piero Bellotti
AIGeo – Associazione Italiana di Geografia fisica e Geomorfologia

E-mail: piero.bellotti@gmail.com

Parole chiave: Paesaggio costiero, Evoluzione ambientale, Impatto naturale e antropico, Tirreno centrale - SIC
Key words: Coastal landscape, Environmental evolution, Natural and anthropogenic impacts, Central Tyrrhenian Sea - SIC

RIASSUNTO

Per definire i caratteri ambientali ed evolutivi del sito di protezione speciale noto come "Palude di Torre Flavia" nel 2017 è stata condotte una serie di studi multidisciplinari. Attraverso analisi sui caratteri geomorfologici, microfaunistici, sedimentologici, stratigrafici e geochimici sono state ricostruite le caratteristiche morfodinamiche per fornire una base di conoscenza per definire le future azioni di monitoraggio e salvaguardia necessarie alla migliore gestione del sito protetto. Questo sito, ubicato lungo la costa del Tirreno centrale immediatamente a nord dell'abitato di Ladispoli, ha un alto valore naturalistico comprendente un'area umida oggi minacciata dall'erosione costiera dovuta sia all'impatto antropico sia al cambiamento climatico. In passato l'area umida era più ampia e la progressiva migrazione verso terra della linea di riva, dovuta soprattutto a una progressiva riduzione dell'apporto sedimentario del Fiume Tevere, ha prodotto una ridotta ampiezza della spiaggia, un danneggiamento del sistema dunare e una conseguente riduzione dell'area retrodunare, caratterizzata da piccoli e poco profondi bacini, di particolare importanza per l'avifauna. I rilievi sono stati ripetuti in marzo e settembre in modo da evidenziare differenze stagionali comunemente prodotte dal regime climatico. Le prevedibili differenze stagionali morfologiche, sedimentologiche e microfaunistiche, sono state in effetti registrate ma sono risultate invertite rispetto a quanto normalmente si verifica nelle aree costiere. Tale anomalia verificatasi nel corso del 2017 fa parte di una serie di irregolarità climatiche verificatesi negli ultimi anni lungo la penisola italiana che testimoniano un cambiamento climatico in corso su scala globale. La zona umida presenta minori variazioni stagionali dovute probabilmente alla sua gestione che prevede ad esempio l'apporto di adeguati volumi di acqua dolce per il mantenimento dei livelli dei bacini dell'area umida nei periodi a maggiore evaporazione. L'analisi chimica non ha evidenziato un significativo inquinamento antropico, mentre la presenza di associazioni di foraminiferi hanno messo in risalto, nel settore settentrionale dell'area studiata, una certa eutrofizzazione delle acque probabilmente causata dal turismo estivo.

ABSTRACT

Environmental evolution and morphodynamics reconstruction were conducted by geomorphological, microfaunistic, geochemical, stratigraphic studies on the Special Protection Site of *Palude di Torre Flavia* (Tyrrhenian Sea, Italy) to provide a background for future monitoring actions to safeguard and manage of this site.

This site has a high naturalistic value, because it includes a wetland area today threatened by coastal erosion due to both anthropogenic impact and climate change. In the past the wetland area was wider, an erosive process still in progress caused its progressive reduction. This erosive character resulted in reduced backshore width and the steepening of the shoreface.

Two seasonal beach profiles, carried out in March and September of 2017, show reversed profile features, confirmed also by microfaunal and sedimentological data. This anomalous climate regime occurring during 2017 belongs to a series of climate irregularities occurring in the last years along the Italian peninsula that testifies an ongoing climate change at a global scale.

On the contrary, the wetland shows minor seasonal changes probably due to the addition of adequate volumes of freshwater for the *Palude di Torre Flavia*'s management. Although the chemical analysis showed no significant anthropogenic pollution the presence of eutrophic foraminiferal assemblages, in the northern sector of the studied area, could be indicative of periodically anthropogenic water eutrophication caused by the summer tourism.

INTRODUZIONE

Le aree costiere costituiscono aree di particolare interesse nell'economia di ciascun paese sia per la popolazione che su di esse insiste, sia per le attività commerciali, turistiche e industriali che esse supportano. Tali aree, tuttavia, hanno anche un alto valore ambientale essendo composte da un mosaico di ambienti che va dalle spiagge, alle zone umide (e.g. lagune, paludi), alle dune, alle falesie, che consentono lo sviluppo di peculiari forme di vita animale e vegetale. Le aree costiere sono inoltre delle aree notevolmente fragili

a causa delle tempeste, della variabilità dell'apporto sedimentario, della variazione relativa del livello del mare e, attualmente, sempre più a causa dell'azione antropica. In particolare le coste sabbiose risentono in tempi brevi delle suddette forzanti e in questi ultimi decenni sono soggette in gran parte a processi erosivi che ne stanno determinando una notevole riduzione areale. Per tale motivo alcuni tratti costieri di particolare interesse naturalistico vengono oggi sottoposti a vincolo col fine di salvaguardarne la stabilità, consentendone una corretta e ragionata utilizzazione. Anche alcuni tratti delle coste del Lazio sono interessati da differenti tipi di vincolo (es. Riserva del Litorale Romano, Litorale di Torre Astura, Tor Caldara, ecc.) così come la "Palude di Torre Flavia" (*Fig.* 1).

2017; Chelli *et al.*, 2018) ma l'area della Palude di Torre Flavia è stata solo recentemente interessata da studi specifici (Davoli *et al.*, 2019; Di Bella *et al.*, 2020). Il presente lavoro non vuol essere altro che una sintesi di questi ultimi due lavori, ai quali si rimanda per tutti i dettagli, semplicemente implementata da qualche nuovo dato e ulteriore considerazione per meglio illustrare le caratteristiche dell'area e la sua peculiare vulnerabilità.

MATERIALI E METODI

Lo studio ha preso in considerazione la ventosità del tratto litorale basandosi sui dati delle stazioni anemometriche di Civitavecchia e Fiumicino che forniscono una registrazione dei dati prossima ai 50 anni, sono stati inoltre

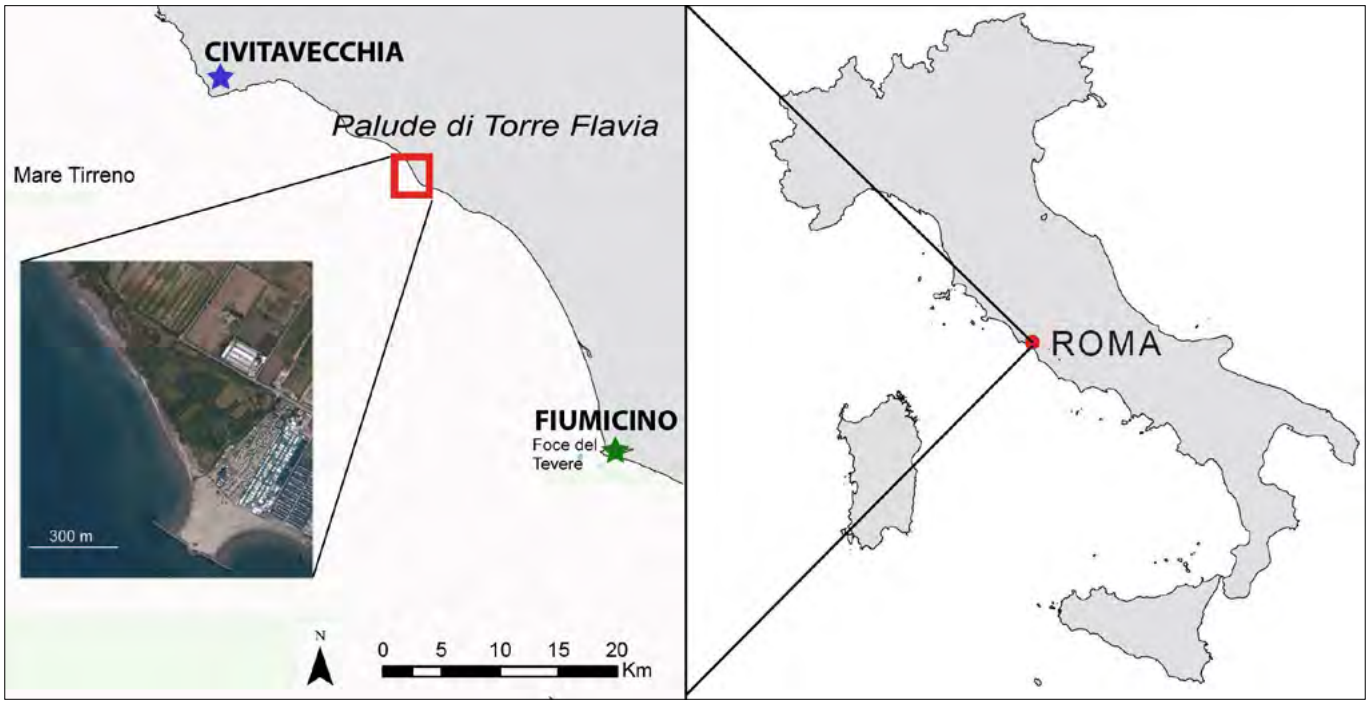


Figura 1. Ubicazione dell'area studiata. Le stelle in blu e verde indicano la posizione delle stazioni anemometriche considerate.

Quest'ultima è un'area umida sita circa 30 km a NW di Roma lungo la costa tirrenica del Comune di Ladispoli. Essendo un'area di particolare interesse ambientale soggetta alle minacce derivanti delle forzanti naturali e antropiche, rientra nella Special Protection Zone (SPZ IT 6030020) ed è Sito di Importanza Comunitaria (SIC IT 60000009) all'interno di Rete Natura 2000. La minaccia principale risulta essere l'erosione costiera che, riducendo la spiaggia, danneggia le dune che sono a protezione della retrostante area umida. Dal punto di vista geologico-geomorfologico le coste del Lazio centrale sono state interessate da diversi studi (A.A.V.V., 1985; SECOA, 2009; Bellotti *et al.*, 2011; Milli *et al.,* 2013; Tarragoni *et al.*, 2014; Mastronuzzi *et al.*, considerati i dati della Rete Ondametrica Nazionale misurati alla boa di Ponza e rilasciati da ISPRA per il periodo 1989-2010, questi hanno consentito di definire il clima meteomarino e la profondità di chiusura attraverso di relazione di Hallermeier (1981). La Tab. 1 riporta i principali dati del clima meteomarino.

L'evoluzione morfologica della costa è stata ricostruita mediante la cartografia IGMI alla scala 1:25000, diversi rilievi aerofotogrammetrici, rilievo LiDAR, e ripetuti rilevamenti di campo comprendenti rilievo GPS della linea di riva e 12 transetti terra-mare ad essa perpendicolari. Due campagne batimetriche *singlebeam* sono state effettuate, in marzo e settembre 2017, fino alla profondità di 10 metri.

Tabella 1. Clima meteomarino della costa centrale del Lazio (modificata da Mastronuzzi *et al.*, 2017).

Periodo di registrazione	*Venti prevalenti (°N)*	*Venti dominanti (°N)*	*Principale direzione delle onde (°N)*	*Altezza d'onda significativa (m)*	*Periodo d'onda (s)*	*Lunghezza d'onda (m)*	*Fetch efficace (km)*	*Profondità di chiusura (m)*	*Escursione di marea sizigiale*
1951-2011	N 180°÷ 255°	N 225° ÷ 270°	N 250° ÷ 290°	3.9	9	126.4	394	7.6	0.4

Un profilo terra-mare è stato effettuato attraverso tutta la zona umida fino alla linea di riva nel giugno 2017.

Due campagne sedimentologiche svolte in marzo e settembre 2017 hanno consentito la raccolta di 41 campioni di sedimento sia su fondale marino che sulla spiaggia e nella zona umida su cui sono state effettuate analisi tessiturali, microfaunistiche e chimiche. Tre carotaggi a percussione di lunghezza inferiore a 5 metri sono stati effettuati nell'area umida per definirne la successione sedimentaria e la variazione diacronica ambientale attraverso l'analisi tessiturale e faunistica. Un quarto carotaggio a rotazione effettuato fino alla profondità di 35 metri al limite interno dell'area studiata, è stato finora solo in parte studiato. Tutti i punti di campionamento e carotaggio sono riportati in *Fig*. 2.

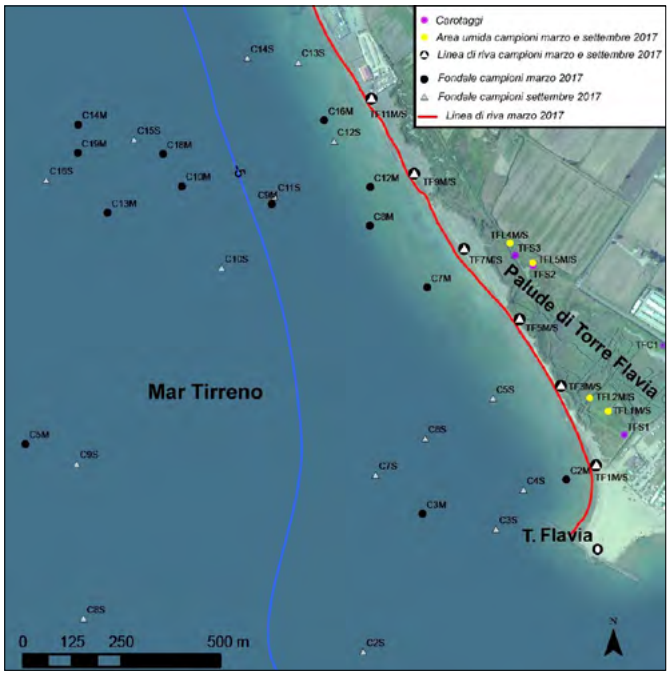


FIGURA 2. Punti di campionamento (modificata da Di Bella *et al.,* 2020).

Le analisi tessiturali del sedimento clastico sono state condotte mediante setacciatura a secco e laser Sympatec rispettivamente per le frazioni > e < di 63 micron e i parametri granulometrici calcolati secondo Folk (1957). I dati tessiturali sono successivamente stati trattati usando il software Clustan 2 per raggruppare campioni simili. L'analisi microfaunistica ha riguardato ostracodi e foraminiferi identificando la microfauna vivente attraverso l'utilizzo di Rosa Bengala (Walton, 1952; Lutze e Altenbach, 1991; Schönfeld *et al.*, 2012). Il genere dei foraminiferi è stato stabilito in accordo con Loeblich e Tappan (1987) l'identificazione specifica è stata basata su Cimerman e Langer (1991) and Sgarrella e Moncharmont Zei (1993). L'identificazione tassonomica degli ostracodi si è basata su Uffenorde (1972), Meisch (2000) and Frenzel *et al.* (2010). Seguendo i protocolli indicati in Salminen *et al.* (1998), per le analisi geochimiche sono stati selezionati 3 campioni dal fondale marino, 5 dal suolo dell'area umida e 7 nei carotaggi a percussione, nei campioni di fondale e in quelli provenienti dai carotaggi sono state analizzate le concentrazioni di elementi in traccia.

RISULTATI

1) Carotaggi (*Fig*. 3). I tre carotaggi a percussione (TFS1-3) mostrano una identica successione verticale. Dal basso, in TFS1 eTFS3, è presente uno strato di sabbia con classamento da medio a buono con lamine piano-parallele a basso angolo. La composizione principale è caratterizzata da quarzo, miche e minerali vulcanici. In TFS3 lo strato contiene fauna con foraminiferi che identificano un ambiente infralitorale (*Asterigerinata* spp., *Ammonia* spp., *Rosalina bradyi*, *Elphidium* spp.) e frammenti di molluschi, echinidi e briozoi. Segue verso l'alto uno strato di sabbie fini sterili con classamento assai variabile come lo spessore. Lo strato è presente anche in TFS2 che essendo il più corto non raggiunge lo strato sottostante. Lo strato più superficiale, con spessore compreso tra 2.15 e 2.65 m è costituito da sabbie argilloso-fangose prive di fauna e con concrezioni carbonatiche e noduli sabbiosi. Il carotaggio a rotazione (TFC1) presenta uno spessore superficiale di 4 m di materiale rimaneggiato passante verso il basso a sabbia ocra con ciottoli < 1cm (spessore 3.20 m) cui segue verso il basso uno strato di sabbia grigia con limo fino alla profondità di 12.40 m. Gli strati sabbiosi vengono attribuiti a un ambiente di spiaggia olocenica, parte emersa parte sommersa (Di Bella, comunicazione personale). Quest'ultimo strato poggia su un livello conglomeratico arrossato spesso 0.10 m con ciottoli policromi arrotondati fino a 2 cm di diametro. Al di sotto del livello conglomeratico segue fino al bottom una successione di silt e argille più o meno limoso-sabbiose del Pliocene inferiore (Di Bella, comunicazione personale).

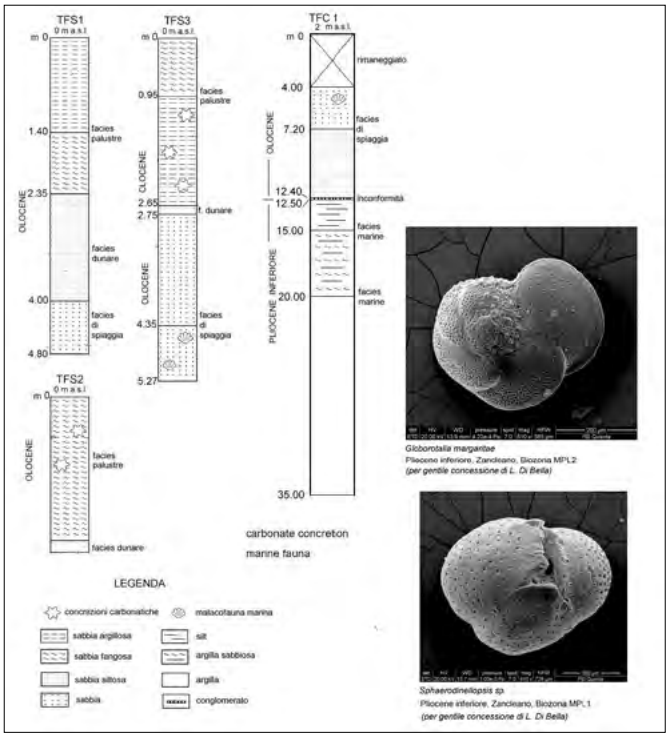


FIGURA 3. Schema stratigrafico dei quattro carotaggi effettuati (modificata da Di Bella *et al.,* 2020).

2) Clima meteomarino (*Fig*. 4; *Tab*. 1) Considerando il settore di traversia di 145° (N 160°-305°), durante il periodo estivo prevalgono i venti occidentali (Fiumicino) e nord-occidentali (Civitavecchia), nel periodo invernale

entrambe le stazioni registrano una prevalenza dei venti da ovest e sud-ovest. Considerando la totalità dei dati annuali nel periodo 1961-2010, prevalgono i venti del terzo quadrante (N 225°-270°) che raggiungono intensità del settimo grado Beaufort. Il fetch efficace per il settore di traversia di 145° risulta di 394 km con valore massimo > 600 km in direzione N 210°. L'escursione di marea massima semidiurna è di 0.40 m.

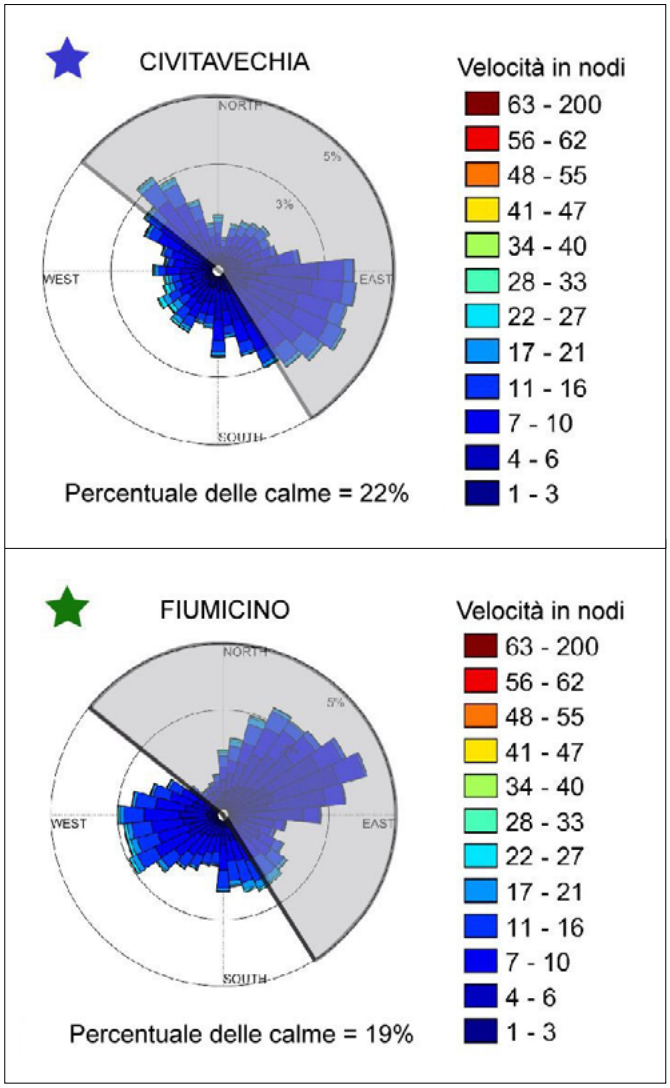


Figura 4. Distribuzione dei venti nelle due stazioni considerate con indicazione del settore di traversia (modificata da Davoli *et al.,* 2019).

prossimità della riva, risultava nel 1973 in mare a 50 m dalla linea di riva. Alla fine degli anni '70 si costruì una difesa costiera che collegò la torre alla riva, ciò consentì la crescita di un tombolo che nel tempo ha raggiunto circa 200 m di ampiezza. Successivamente al 2005 l'arretramento della linea di riva è proseguito in modo meno marcato ma la spiaggia si è comunque ulteriormente ridotta e il fragile cordone dunare è stato frammentato da più fenomeni di *washover*.

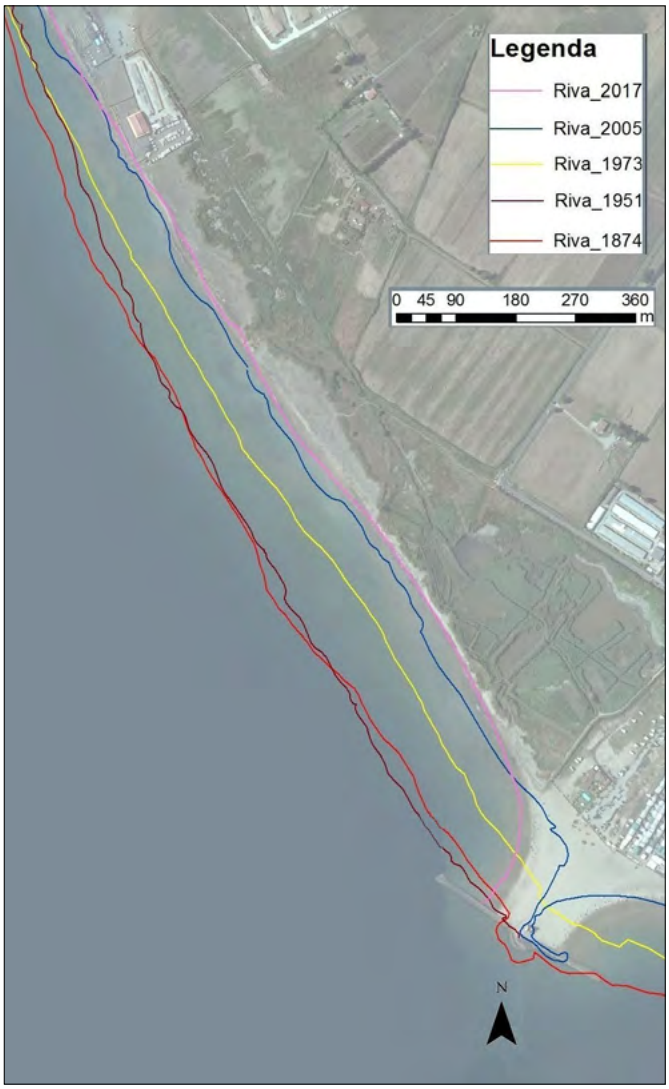


Figura 5. Linee di riva storiche (modificata da Di Bella *et al.,* 2020).

3) Variazioni storiche della linea di riva (*Fig.* 5). Le variazioni della linea di riva osservate tra il 1874 e il 2019 mettono in evidenza una netta tendenza all'arretramento. Tuttavia tale tendenza non risulta continua in quanto i dati mostrano una tendenza alla quasi stabilità nel periodo 1874-1950 e un secondo periodo (1951-2019) di intenso arretramento (Caputo *et al.,* 1981; 1982; 1991; D'Alessandro *et al.*, 2002; Battisti, 2006). Fino al 1925 l'area indagata presentava una spiaggia emersa ampia circa 50 m con dune di altezza fino a 5 m e una retrostante area umida ampia 0.23 km^2. Dopo il 1950 e fino al 2005 si registra una perdita di 180.000 m^{2}con un arretramento medio della linea di riva di 120 m e un massimo di 150. Questo arretramento ha indotto la migrazione verso terra del sistema spiaggia-duna e la conseguente riduzione della retrostante area umida. La torre costruita in

4) Situazione morfologica attuale. Tre differenti morfotipi sono oggi riscontrabili nell'area della Palude di Torre Flavia. Da terra verso mare si riconosce un'area umida, un cordone dunare e una spiaggia. L'area umida presenta una forma triangolare frammentata in piccoli bacini palustri che durante il rilievo del giugno 2017 hanno mostrato la minima quota di -0.9 m (*Fig.* 6). Il cordone dunare borda verso mare l'area umida, ha una altezza massima di 4.7 m con pendenza verso mare tra 10.6 e 39% e presenta diversi *blowout*. La spiaggia emersa si allunga in direzione NW-SE per circa 1 km assumendo, in prossimità della difesa costiera a protezione della torre, un andamento arcuato a formare un tombolo. I rilievi del 2017 hanno evidenziato una ampiezza variabile della spiaggia da 16 a 40 m con pendenze variabili da 3 a 7% (le minori in prossimità del

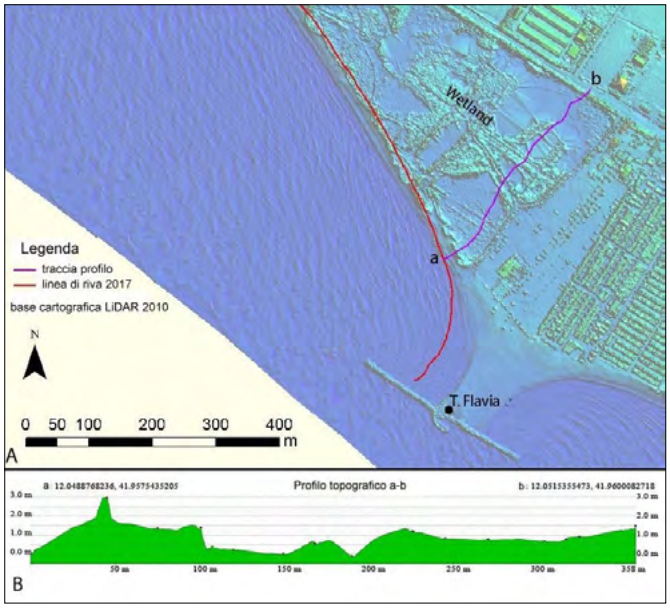


FIGURA 6. Traccia del profilo topografico dalla linea di riva del 2017 al limite interno dell'area umida (A). Profilo topografico effettuato con GPS differenziale (B) (modificata da Di Bella *et al.*,2020).

tombolo). Questi valori risultano variabili in funzione dello stato del mare che periodicamente genera *rip currents* e *sandwaves*. La spiaggia sommersa si estende fino alla profondità di chiusura calcolata in 7.6 m che si rinviene fino a 1.2 km dalla linea di riva. Fino all'isobata -3 m la pendenza appare uniforme e compresa tra 1.5 e 2%. Tra -3 e -10 m la morfologia del fondale è più complessa e caratterizzata da una forma arcuata che si estende dalla torre verso NW e che è in relazione alla struttura morfologica sommersa nota come "Secche di Torre Flavia". I rilievi batimetrici del 2017 mostrano una pendenza (1.3%) ridotta sia rispetto a quella del 2011 (2.2%) sia del 1981 (3.6%) in particolare nell'area meridionale dove si risente l'effetto dell'opera a protezione della torre. Le registrazioni batimetriche (marzo e settembre 2017) mostrano una maggiore inclinazione dei fondali nella parte settentrionale. Entro i 6 metri di profondità le pendenze sono piuttosto costanti e si raccordano con un ampio fondale più piatto e parzialmente roccioso. Inoltre, nella parte centrale e settentrionale, alla profondità di 4 m si sviluppano alcune deboli incisioni (*gullies*) che appaiono più inclinati nel rilievo di settembre.

5) **Caratteri sedimentologici della spiaggia**. L'analisi multivariata svolta sui dati tessiturali dei campioni di fondale e di battigia prelevati contestualmente alle campagne batimetriche hanno fornito quattro gruppi di campioni sia per la campagna di marzo sia per quella di settembre. In marzo (*Fig.*, 7a), il gruppo (a) è composto da un solo campione prelevato nella parte settentrionale in prossimità della profondità di chiusura e costituito da silt sabbioso mal classato con scarsa componente bioclastica. Due campioni, costituiti da sabbie medio-grossolane mediamente classate con abbondante frazione bioclastica, rappresentano il gruppo (b); i due campioni sono stati prelevati a differenti profondità (-2.5 e -10 m). Anche il gruppo (c)

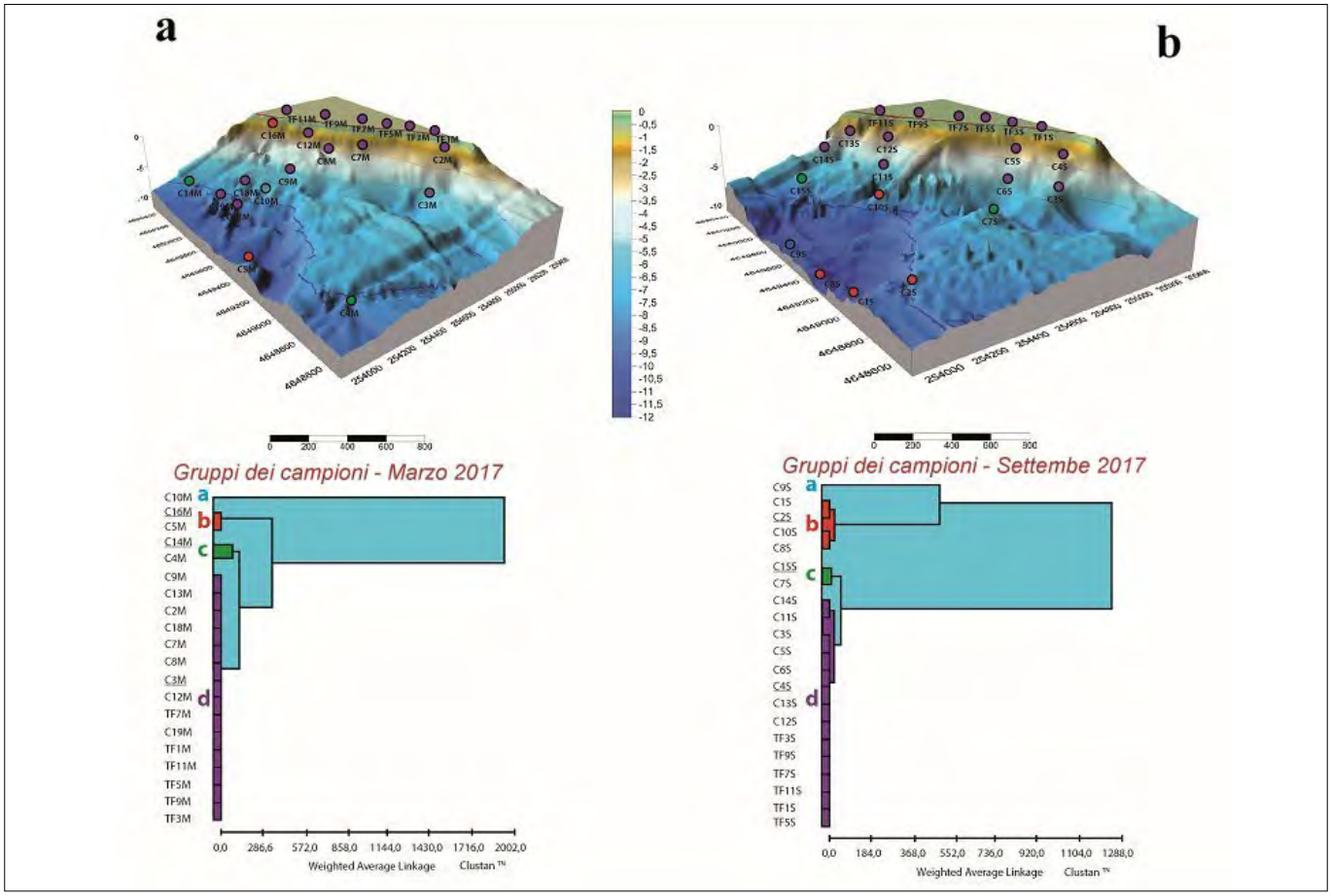


FIGURA 7. Ricostruzione tridimensionale dei fondali elaborata dai rilievi batimetrici di marzo (a) e settembre (b) 2017 e distribuzione dei campioni. I colori di ciascun campione sono relativi al gruppo indicato nel relativo grafico dall'analisi di raggruppamento. I caratteri tessiturali di ciascun gruppo sono indicati nel testo (modificata da Di Bella *et al.*, 2020).

consta di due campioni prelevati a circa -8 m ma uno nel settore settentrionale l'altro in quello meridionale; i campioni sono costituiti da sabbie fini fangose mal classate con abbondante frazione bioclastica. La maggior parte dei campioni ricade nel gruppo (d) costituito da sabbie medio-fini ben classate; quasi tutti i campioni provengono dalla battigia e dai fondali entro la profondità di chiusura, solo due campioni sono stati prelevati a maggiore profondità nell'area settentrionale. In settembre *(Fig.* 7b), il gruppo (a) è rappresentato da un campione di sabbia medio-grossolana mediamente classato con abbondante frazione bioclastica prelevato a -10 m nella parte centrale. Il gruppo (b) include quattro campioni di sabbia medio-grossolana ben classata e con abbondante frazione bioclastica; i campioni son localizzati in prossimità della profondità di chiusura o oltre nella parte meridionale. Due campioni, prelevati a 7 e 8 m di profondità, costituiscono il gruppo (c) di sabbia mal classata con scarsa frazione bioclastica. Similmente alla campagna di marzo, la maggior parte dei campioni ricade nel gruppo (d) di sabbia medio-fine ben classata presente sulla battigia e sui fondali fino a -5 m.

6) Microfauna bentonica nei sedimenti marini (*Fig*. 8a e 8b). Nei campioni prelevati in marzo sono state identificate 23 specie e 17 generi (escluse le le miliolidi) di foraminiferi viventi. I taxa più rappresentativi sono miliolidi, *Ammonia gaimardii, Ammonia parkinsoniana, Elphidium crispum,Miniacina miniacea e Rosalyna bradyi*. Tra i foraminiferi non viventi prevalgono miliolidi, *Ammonia beccarii A. Gaimardii, A. parkinsoniana, Asterigerinata mamilla* ed *E. crispum*. Le specie viventi consentono di definire tre associazioni presenti lungo la costa di Torre Flavia. L'associazione ad *Ammonia gaimardii* è presente in quattro campioni e distribuita tra -2 e -10 m. L'associazione a miliolidi è caratterizzata dalla dominanza di specie porcellanacee talvolta accompagnate da *A. mamilla, Cibicidoides lobatulus*, e *Rosalina* spp. Tale associazione è presente tra -1 e -3 m ma localmente anche tra -5 e-9 m. Associazione ad epifauna dominata da *Miniacina miniacea* e *R. bradyi* dominano un campione a – 8 m. Nei campioni prelevati in settembre è presente un maggior numero di foraminiferi viventi rispetto a marzo con 28 specie e 17 generi riconosciuti. I taxa più abbondanti oltre le miliolidi sono *A. gaimardii*, *A. parkinsoniana*, *E. crispum, R. bradyi* e *Textularia bocki.* I taxa più abbondanti tra i foraminiferi non viventi sono miliolidi, *A. gaimardii, A. parkinsoniana, A. mamilla, E. crispum* e *R. bradyi.* Quattro diverse associazioni sono state identificate. L'associazione a *A. gaimardii* domina sei campioni tra le isobate -7.5 e -9 m. L'associzione a miliolidi con particolare frequenza di *R. bradyi*, èpresente in tre campioni tra -5 e -10 m nel settore settentrionale. L'associazione ad epifauna domina in quattro campioni tra le isobate -2.5 e -7.5 m, *R. bradyi* è la specie più abbondante seguita da miliolidi, *A. gaimardii, A. parkinsoniana* e *C. lobatulus.* L'associazione ad *A. parkinsoniana* è presente in due campioni del settore settentrionale a -2.5 m.

7) Microfauna bentonica nei sedimenti dell'area umida. Nei piccoli bacini di quest'area i foraminiferi sono pressoché assenti. Solo rari individui di *Lagenammina* cf. *L.fusiformis* e *Cribrostomoides jeiffreysi* sono stati riconosciuti tanto nei campioni di marzo quanto in quelli di set-

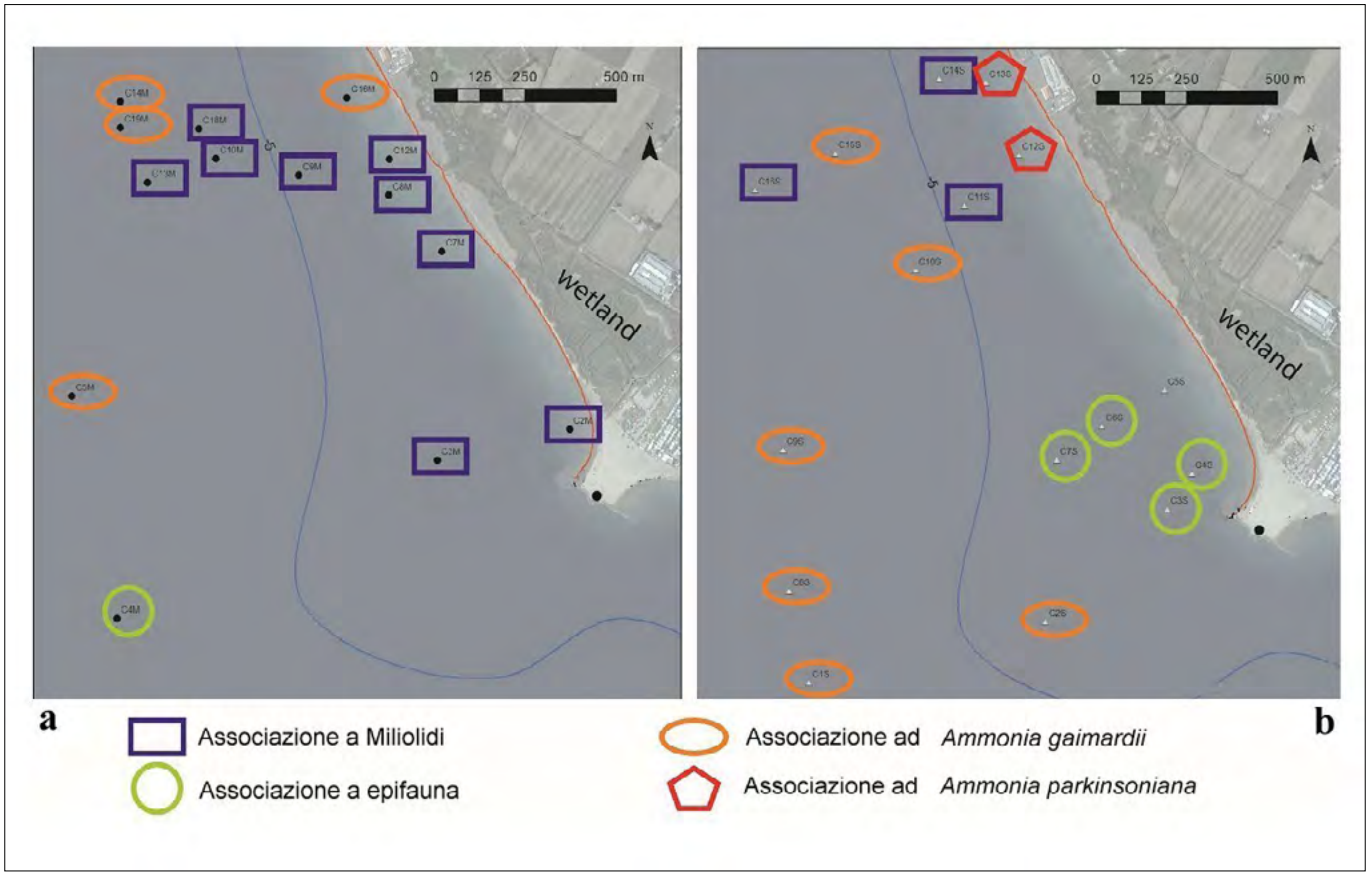


Figura 8. Distribuzione delle associazioni a foraminiferi nel fondale di marzo (a) e settembre (b) 2017 (modificata da Di Bella *et al.*,2020).

tembre. Sono al contrario abbondanti valve di ostracodi. In marzo prevale l'associazione a *Cypreides torosa* e *Heterocypris salina* con subordinata *Candonocypris novaezelandiae*. In settembre è l'associazione a *Candonocypri novaezelandiae* e *H. salina* a dominare, con subordinata presenza di *Cypreides torosa, Hyliocypris inermis, Physiocypria kraepelini* e *Sarscypridopsis aculeata.*

8) Parametri fisico-chimici. Temperatura, conducibilità e pH delle acque sono stati misurati in cinque punti dell'area umida e in uno del mare sia in marzo sia in settembre. In marzo, il range della temperatura nell'area umida era compreso tra 13.8 e 17.7 °C con l'acqua marina a 16.1 °C; in settembre i valori risultarono rispettivamente 23.4 – 32.4 °C e 25.1 °C. La conducibilità, che fornisce una misura della salinità, risultava in marzo variabile tra i punti di prelievo dell'area umida da 2.99 e 3.23 µS/cm e 54.70 µS/cm in mare; in settembre i valori risultarono rispettivamente 2.18-2.92 µS/cm e 51.40 µS/cm. I valori di pH risultarono in marzo variabili tra 7.69 e 7.82 nell'area umida e 8.26 in mare mentre in settembre i valori risultarono rispettivamente 6.97-8.20 e 8.18. Tra gli elementi in traccia analizzati, il vanadio e l'arsenico presentano valori ragguardevoli nei sedimenti. Per il vanadio i valori variano tra 77.52 e 246.8 mg/Kg nei sedimenti marini e dell'area umida mentre nei sedimenti dei carotaggi a percussione la loro variabilità era tra 57.38 e 135.4 mg/Kg. Per l'arsenico i valori risultarono variabili rispettivamente tra 22.95 e 48.83 mg/Kg e tra 16.23 e 34.56 mg/Kg.

DISCUSSIONE

I dati del carotaggio C1 mettono in evidenza che l'area della Palude di Torre Flavia sorge su una zona rialzata poco a nord del graben del Tevere. Nel carotaggio, infatti, una inconformità basale mette a contatto i depositi olocenici con quelli del Pliocene inferiore. L'assenza di sedimenti del Pliocene superiore e del Pleistocene fa supporre uno *iatus* sedimentario soprattutto in considerazione del fatto che solo 30 km a SE il solo Pleistocene inferiore presenta spessori superiori a 80 m (Carboni, 1993), Il livello conglomeratico decimetrico che marca la suddetta inconformità dimostra un evento erosivo che tuttavia non può che aver eroso una limitata quantità di sedimento. Per quanto riguarda i sedimenti olocenici i carotaggi effettuati nell'area umida mostrano una successione regressiva con facies di spiaggia a cui si sovrappone una facies dunare e infine una facies continentale retrodunare che costituisce la presente area umida. Quest'ultima tuttavia non presenta né livelli di torba, come le aree retrodunari note in buona parte della costa tirrenica centrale, (Bellotti *et al.,* 2011; 2018; D'Orefice *et al.,* 2020; Di Bella *et al.,* 2022), né una significativa fauna e contiene concrezioni carbonatiche, ciò fa supporre che si tratti, almeno in parte, più di un bacino retrodunare acquitrinoso che di una vera palude o laguna stabile nel tempo. Non ci sono dati certi sul periodo in cui la successione regressiva si sia sviluppata ma appare ragionevole supporre che lo sviluppo sia iniziato successivamente alla quasi stabilizzazione del livello marino, ultimi 6000 anni circa, come già riscontrato in diverse aree della costa del Lazio (Bellotti *et al.*, 1989; 2016 2011; 2018; Giraudi 2004; Milli *et al.,* 2013; 2016). L'esame della variazione della linea di riva mostra che a partire dalla metà del secolo scorso il sistema spiaggia-duna è migrato verso terra trasgredendo parte del bacino retrodunare che si è ridotto di estensione. Tale fenomeno appare in diretta relazione con la variazione delle portate torbide del Fiume Tevere (*Fig*. 9)

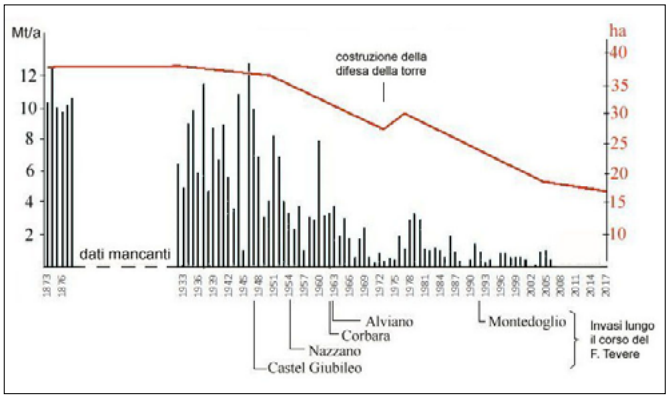


FIGURA 9. Confronto tra le portate torbide del Fiume Tevere, misurate o calcolate sui dati della stazione idrometrica di Ripetta, e l'ampiezza della spiaggia dell'area studiata.

che a partire dagli anni '40 dello scorso secolo mostrano un rapido decremento in coincidenza dalla costruzione di una serie di sbarramenti costruiti lungo il suo corso; solo la costruzione dell'opera a difesa della torre ha temporaneamente rallentato la migrazione verso terra della linea di riva. La testimonianza dell'evento trasgressivo iniziato a metà del secolo scorso, che al momento non riguarda l'area umida dove sono stati effettuati i carotaggi a percussione, è facilmente individuabile lungo la spiaggia dove localmente sono visibili i depositi sabbioso pelitici del bacino retrodunare sottostanti a uno scarso spessore di sabbie di spiaggia o di duna. Tale testimonianza appare particolarmente evidente a seguito di eventi di tempesta che erodono totalmente il deposito di spiaggia riesumando i sedimenti sabbioso pelitici più resistenti per la loro coesione (*Fig*. 10). La

FIGURA 10. Testimonianza della fase trasgressiva indotta dalla prolungata fase erosiva. I sedimenti palustri (scuri) più coesivi e relativamente meno erodibili, sono messi a giorno dopo le tempeste che inducono la migrazione verso terra del sistema spiaggia duna.

morfodinamica della spiaggia è prevalentemente guidata dai venti dominanti e dalle onde provenienti da ovest e sud-ovest le quali generano una corrente lungoriva che fluisce da sud verso nord ed è responsabile del trasporto di sedimenti lungo la spiaggia (A.A.V.V., 1985; Bellotti *et al.,*

1994; Mastronuzzi *et al.,* 2017). L'opera di difesa in prossimità della torre e la locale piattaforma rocciosa sommersa hanno favorito una locale progradazione (tombolo) determinando una erosione nella parte più settentrionale del settore studiato. La ridotta estensione della spiaggia emersa e l'aumento della pendenza della spiaggia sommersa unitamente alle incisioni sul fondale (*gullies*) generati dalle *rip-currents* sono evidenze morfologiche della tendenza erosiva. Nella maggior parte dei casi la dinamica stagionale induce nel periodo estivo un ampliamento della spiaggia emersa e un avvicinamento alla riva delle barre sabbiose sommerse; al contrario del periodo invernale in cui si verifica una riduzione della spiaggia emersa, un aumento della pendenza e una posizione più distante delle barre sommerse che risultano più discontinue. I rilievi condotti nel 2017 hanno mostrato una inaspettata anomalia. I dati batimetrici rilevati in marzo mostrano caratteri dei fondali più tipici del periodo estivo di quanto non facciano quelli rilevati in settembre. Probabilmente ciò deriva dalle condizioni metereologiche presenti a ridosso delle date dei rilievi. I dati anemometrici hanno mostrato una maggiore frequenza dei venti da sud e da ovest durante la primavera e l'estate 2017 rispetto agli anni precedenti. La barra sabbiosa era più prossima alla riva all'inizio della primavera e una ulteriore barra fu individuata tra -3 e -5 m. Contrariamente alcuni occasionali eventi di tempesta interessarono il litorale alla fine dell'estate muovendo la barra verso mare. Tale anomalia è registrata in parte dai dati sedimentologici del gruppo di sedimento più rappresentato; essi mostrano una tessitura più grossolana del sedimento di spiaggia in settembre (*phi* = 2.92, sabbia fine) rispetto a marzo (*phi* = 3.22, sabbia molto fine). Inoltre i campioni di sabbia più grossolana trasferita oltre la profondità di chiusura (gruppo b) sono in numero maggiore in settembre. L'anomalia è anche confermata dai dati microfaunistici. Le quattro associazioni di foraminiferi sono simili nei due rilievi ma la loro distribuzione è differente. In particolare l'associazione ad *Ammonia gaimardii* domina in quattro campioni in marzo tra -2 e -10 m, mentre in settembre prevale in sei campioni tra -7.5 e -9 m. Essendo *Ammonia gaimardii* frequente in fondali detritici e con sabbie grossolane (Sgarella e Moncharmont-Zei, 1993; Aiello *et al.,* 2006; Murray, 2006) la sua distribuzione testimonia una maggiore turbolenza in settembre. L'associazione a epifauna dominata da taxa tipici di fondali grossolani e rocciosi (*Miniacina miniacea, R. bradyi, C. lobatulus*) (Di Geronimo *et al.,* 2001; Schönfeld, 2002; Murray, 2006) è registrata in un solo campione a – 8 m in marzo e in più campioni tra -2.5 e -7.5 m in settembre che può indicare una maggiore presenza di sabbie più grossolane alla fine dell'estate. Infine l'associazione ad *Ammonia parkinsoniana* è presente solo nella parte settentrionale in prossimità della città di Cerenova nel solo rilievo di settembre. Considerando che tale specie tollera ambienti instabili, variazioni di salinità, temperatura, ossigeno e nutrienti (Jorissen, 1988; Debenay *et al.,* 2000; 2005; Carboni *et al.,* 2009; Frezza e Carboni, 2009) è possibile che la sua distribuzione indichi una eutrofizzazione delle acque costiere causata dal turismo estivo. La scarsezza e la bassa diversità dei foraminiferi nei bacini dell'area umida indicano un ambiente sfavorevole alla loro vita soprattutto per carenza di ossigeno e alto contenuto in materia organica. Considerando che *Lagenamina* cf *fusiformis* e *Cribro-*

Figura 11. Vista dei tre morfotipi presenti in un punto particolarmente critico dell'area studiata. Appare evidente lo stato di estrema sofferenza del sito e l'alta vulnerabilità della zona palustre protetta da una sottile duna e una ridotta spiaggia emersa.

stomoides jeffreysi sono presenti in condizioni ambientali critiche tollerando bassi valori di pH e salinità e alti input di materiale terrigeno e organico (Murray, 2006; Di Bella *et al.,* 2016; 2018) è ragionevole asserire che l'alto grado di confinamento e l'elevato contenuto in fitodetrito inibisce nei piccoli bacini dell'area umida lo sviluppo di tipiche associazioni lagunari di foraminiferi. La ostracofauna suggerisce un ambiente salmastro sebbene in marzo alcuni campioni presentino un relativo incremento di salinità testimoniato dalla dominanza di *Cyprides torosa*. Diversamente nei campioni di settembre l'ostracofauna (*Candonocypris novaezelandiae, Heterocypris salina, Phisocypria kraepelini e Sarscypridopsis aculeata*) (Meisch, 2000; Vals *et al.,* 2013) indica una minore salinità, scarsità di ossigeno e alto contenuto in materia organica. A questo proposito va ricordato che nel periodo estivo allorché il livello dell'acqua nei bacini dell'area umida scende eccessivamente viene immessa artificialmente dell'acqua dolce. I valori elevati di vanadio e arsenico potrebbero sfavorire la vita dei foraminiferi più che degli ostracodi nelle acque dell'area umida, Va tuttavia considerato che tali valori vanno attribuiti alle caratteristiche dell'area vulcanica prossima alla Palude di Torre Flavia (Cinti *et al.*, 2015) e non a un effetto antropico. I valori definiti nelle analisi condotte nel 2017 rientrano nei limiti stabiliti dalla legge italiana per i suoli industriali (250 mg/Kg per il vanadio e 50 mg/Kg per l'arsenico) anche se possono indicare un certo grado di vulnerabilità per un'area protetta. Per l'area in esame tuttavia la maggiore vulnerabilità è data dall'erosione che dalla metà del secolo scorso ha ridotto la spiaggia, posto in sofferenza le dune e diminuito l'ampiezza dell'area umida protetta ormai da un esile cordone dunare (*Fig*. 11). L'aumento delle turbolenze indotte dal riscaldamento globale, che generano un moto ondoso più vivace anche nel periodo estivo, rende particolarmente critica la situazione. A ciò va aggiunto il sollevamento del livello marino. A tal proposito una simulazione basata sulla regola di Bruun (1962), considerando il sollevamento di 37,5 cm al 2050 (Antonioli *et al.,* 2017) e i parametri morfometrici della spiaggia misurati nel 2017, indica un possibile arretramento della linea di riva, al 2050, compreso tra 19 e 44 metri con evidenti possibili conseguenze sull'area protetta.

CONCLUSIONI

La Palude di Torre Flavia è quel che rimane di una più ampia area retrodunare originatasi quando uno stabile sistema spiaggia-duna si sviluppò grazie al rifornimento sedimentario del Tevere e alla progradazione del suo delta. A partire dalla metà del secolo scorso, la forte riduzione degli apporti torbidi tiberini ha innescato una fase erosiva con conseguente migrazione verso terra del sistema spiaggia-duna che trasgredendo il retroduna lo ha notevolmente ridotto in estensione. L'area mostra una maggiore vulnerabilità nella parte centrale e settentrionale. Senza un'adeguata opera di protezione o di rinnovato apporto sedimentario, il fenomeno erosivo è probabilmente destinato a proseguire riducendo sempre più il retroduna. L'aumentata probabilità del verificarsi di eventi di tempesta, indotta da cambiamento climatico in atto, incrementa la vulnerabilità dell'esile cordone dunare, oggi presente, per possibili rapide immissioni di acqua marina nell'area protetta.

BIBLIOGRAFIA

A.A.V.V. (1985). *Atlante delle Spiagge Italiane 1985. Dinamismo, Tendenza Evolutiva, Opere Umane. Fogli 143/149*. CNR-MURST, SELCA. Firenze.

Aiello G., Barra D., Coppa M. G., Valente A., Zeni F. (2006). *Recent infralittoral Foraminiferida and Ostracoda from the Porto Cesareo Lagoon (Ionian Sea, Mediterranean)*. Boll. Soc.. Paleontol. Ital. 45(1):1–14.

Battisti C. (2006). *La Palude di Torre Flavia. Biodiversità, Gestione, Conservazione di un'area umida del litorale tirrenico.* Gangemi, Rome.

Antonioli, F., Anzidei, M., Amorosi, A., Lo Presti, V., Mastronuzzi, G., Deiana, G., De Falco, G., Fontana, A., Fontolan, G., Lisco, S., Marsico, A., Moretti, M., Orru', P.E., Sannino, G.M., Serpelloni, E., Vecchio, A. (2017). *Sea-level rise an potential browning of the Italian coastal plains flooding risk scenarious for 2100*. QSR, 158, 29-43.

Bellotti P., Carboni M. G., Milli S, Tortora P., Valeri P. (1989). *La piana deltizia del Fiume Tevere: Analisi di facies ed ipotesi evolutiva dall'ultimo 'low stand' glaciale all'attuale*. Giorn. Geol. 51:71–91.

Bellotti P., Chiocci F. L., Milli S., Tortora P., Valeri P. (1994). *Sequence stratigraphy and depositional setting of the Tiber Delta: integration of high-resolution seismics, well logs and archeological data*. JSR 64(3):416–432.

Bellotti P., Calderoni G., Di Rita F, D'Orefice M., D'Amico C., Esu D., Magri D., Preite Martinez M., Tortora P., Valeri P. (2011). The *Tiber River delta plain (central Italy): coastal evolution and implications for the ancient Ostia Roman settlement*. Holocene 21:1105–1116.

Bellotti P., Calderoni G., Dall'Aglio P.L., D'Amico C., Davoli L., Di Bella L,. D'Orefice M., Esu D., Ferrari K., Bandini Mazzanti M., Mercuri A.M., Tarragoni C., Torri P. (2016). *Middle-to late Holocene environmental changes in the Garigliano delta plain (Central Italy): which landscape witnessed the development of the Minturnae Roman colony?* Holocene 26(9):1457–1471.

Bellotti P., Davoli L,. Sadori L. (2018). *Landscape diachronic reconstruction in the Tiber delta during historical time: a holistic approach.* GFDQ 41:3–21.

Bruun P. (1962). *Sea-level rise as a cause of shore erosion. Proceedings of the American Society of Civil Engineers.* Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88*, 117–130.

Caputo C., Lupia Palmieri E., Pugliese F. (1981). *Variazioni della linea di riva lungo la Maremma toscolaziale, fra Ansedonia e Capo Linaro.* Riv Geogr It 88(2):221–242.

Caputo C., D'Alessandro L., La Monica G. B., Landini B., Lupia Palmieri E., Pugliese F. (1982).

Erosion problems on the coast of Lazio, Italy. In: Coastal problems in the Mediterranean Sea, Proc. Symp. Venice, I.G.U. Comm Coast Envir, pp 59–68, Bologna.

Caputo C., D'Alessandro L,. La Monica G. B., Landini B., Lupia Palmieri E. (1991). *Present erosion and dynamics of Italian beaches.* Z Geomorph NF Supp Bd 81:31–39.

Carboni M. G., Succi M. C., Bergamin L., Di Bella L., Frezza V., Landini B. (2009). *Benthic foraminifera from two coastal lakes of southern Latium (Italy). Preliminary evaluation of environmental quality*. Mar Pollut Bull 59:268–280.

Chelli A., Aringoli D., Aucelli P., Baldassarre M. A., Bellotti P., Bini M., Biolchi S., Bontempi S., Brandolini P.L., Davoli L,. Deiana G., De Muro S., Devoto S., Di Paola G., Donadio C., Fago P., Ferrari M., Furlani S., Ibba A., Lupia Palmieri E., Marsico A., Melis R. T., Milella M., Mucerino L., Nesci O., Orrù P., Panizza V., Pennetta M., Piacentini D., Piscitelli A., Pusceddu N., Raffi R., Rosskopf C. M., Sansò P., Stanislao C. (2018). *Morphodynamics of coastal areas represented in the new geomorphologic map of Italy: draw the landforms of the past to outline the future. Quaternary: past, present, future*—AIQUA conference, Florence, 13–14/06/2018. AMQ 31:17–21.

Cimerman F, Langer M. R. (1991). *Mediterranean foraminifera*. Acc Scient et Artium Slov Ljubljana 30:1–118.

Cinti D., Poncia P. P., Brusca L., Tassi F., Quattrocchi F., Vaselli O. (2015). *Spatial distribution of arsenic, uranium and vanadium in the volcanic-sedimentary aquifers of the Vicano-Cimino Volcanic District (Central Italy)*. J Geochem Explor 152:123–133.

Carboni M. G.(1993). *Contributo alla stratigrafia del Quaternario Laziale*. Il Quaternario 6, 27 – 34.

D'Alessandro L., Davoli L., Lupia Palmieri E., Raffi R. (2002). *Natural and anthropogenic factors of the recent evolution of beaches in Calabria (Italy).* In: Allison RJ (ed) Applied geomorphology theory and practice. Wiley, Chichester, pp. 397–427.

D'Orefice M., Bellotti P., Bertini A., Calderoni G., Censi Neri P., Di Bella L., Fiorenza D., Foresi L. M., Louvari M. A., Rainone L., Vittori C., Goiran J. P., Schmitt L., Carbonel P., Preusser F., Oberlin C., Sangiorg F., Davoli L. (2020). *Holocene evolution of the Burano Paleo-Lagoon (Southern Tuscany, Italy)*. Water 12(1007):1–22.
https ://doi.org/10.3390/w1204 1007

Davoli L., Raffi R., Baldassarre A. M., Bellotti P., Di Bella L. (2019). *New maps relative to the «Palude di Torre Flavia» (Central Tyrrhenian Sea-Italy) prone to severe coastal erosion*. IJEGE 2:13–21.

Debenay J. P, Guillou J. J., Redois F., Geslin E. (2000). *Distribution trends of foraminifera assemblages in paralic environments.* In: Martin RE (ed) Env micropaleontology, vol 1. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 39–67.

Debenay J. P., Tsakiridis E., Foulard R., Grossel H. (2001). *Factors determining the distribution of foraminiferal assemblages in Port Joinville Harbor (Ile d'Yeu, France): the influence of pollution*. Mar Micropaleontol 43:75–118.

Debenay J. P., Millet B., Angelidis M. O. (2005). *Relationships between foraminiferal assemblages and hydrodynamics in the Gulf of Kalloni, Greece*. J. Foramin. Res. 35:327–343.

Di Bella L., Ingrassia M., Frezza V., Chiocci F. L., Martorelli E. (2016). *The response of benthic meiofauna to hydrothermal emissions in the Pontine Archipelago, Tyrrhenian Sea (central Mediterranean Basin).* J. Marine Syst. 164:53–66.

Di Bella L., Ingrassia M., Frezza V., Chiocci F. L., Pecci R., Bedini R., Martorelli E. (2018). *Spiculosiphon oceana (Foraminifera) a new bio-indicator of acidic environments related to fluid emissions of the Zannone Hydrothermal Field (central Tyrrhenian Sea).* Mar Environ Res 136:89–98.

Di Geronimo I., Di Geronimo R., Rosso A., Sanfilippo R. (2001). *Structural and taphonomic analysis of a columnar coralline algal build-up from SE Sicily.* Geobios Lyon Mémoire Spec 24:86–95.

Di Bella L., Raffi R., Alivernini M., Baldassarre M. A., Barbieri M., Bellotti P., Biancone M., Calise G., D'Orefice M., Frenzel P., Frezza V., Tarragoni C., Davoli L. (2020). *Coastal morphodynamics and environmental assessment of the Special Protection Site of Palude di Torre Flavia (Tyrrhenian Sea, Italy).* Environmental Earth Sciences (2020) 79:514. https://doi.org/10.1007/s12665-020-09257-z

D'Orefice M., Bellotti P., Bellotti T., Davoli L., Di Bella L. (2022). *Natural and Cultural Lost Landscape during the Holocene along the Central Tyrrhenian Coast (Italy).* Land 2022, 11, 344. https://doi.org/10.3390/land11030344

Folk R. L., Ward W. C. (1957). *Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters.* JSR 27(1):3–26.

Frenzel P., Keyser D., Viehberg F. A. (2010). *An illustrated key and (palaeo) ecological primer for Postglacial to Recent Ostracoda (Crustacea) of the Baltic Sea*. Boreas 39(3):567–575.

Frezza V., Carboni M. G. (2009). *Distribution of recent foraminiferal assemblages near the Ombrone River mouth (Northern Tyrrhenian Sea, Italy).* Rev. Micropal. 52:43–66.

Giraudi C. (2004). *Evoluzione tardo-olocenica del delta del Tevere*. Ital J Quat Sci 17:477–492.

Grottoli G., Ciavola P. (2012). *Morfodinamica e risposta a corto e medio termine ad eventi di mareggiata delle spiagge comprese tra Foce Bevano e Lido di Classe (RA)*. Studi Costieri 20:25–46.

Hallermeier R. J. (1981). *Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains*. Sedimentology 28(6):859–865.

Jorissen F. J. (1988). *Benthic foraminifera from the Adriatic Sea: principles of phenotypic variations*. Utrecht Micropalontol Bull 37:1–176.

Loeblich AR J. r., Tappan H. (1987). *Foraminiferal genera and their classification.* Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Lutze G. F., Altenbach A. (1991). *Technik und Signifikanz der Lebendfarbung benthischer Foraminiferen mit Bengalrot.* Geol Jahrb A 128:251–265.

Mastronuzzi G., Aringoli D., Aucelli P., Baldassarre M. A., Bellotti P., Bini M., Biolchi S., Bontempi S., Brandolini P., Chelli A., Davoli L., Deiana G., De Muro S., Devoto S., Di Paola G., Donadio C., Fago P., Ferrari M., Furlani S., Ibba A., Lupia Palmieri E., Marsico A., Melis R. T., Milella M., Mucerino L., Nesci O., Orrù P., Panizza V., Pennetta M., Piacentini D., Pisciotelli A., Pusceddu N., Raffi R., Rosskopf C. M., Sansò P., Stanislao C., Tarragoni C., Valente A. (2017). *Geomorphological map of the Italian Coast. From a descriptive to a morphodynamic approach*. GFDQ 40:175–178. https ://doi.org/10.4461/GFDQ.2017.40.11

Meisch C. (2000). *Ostracoda*. Süßwasserfauna von Mitteleuropa. Bd. 8: Crustacea: 3. Spektrum Akad Verlag, Heidelberg.

Milli S., D'Ambrogi C., Bellotti P., Calderoni G., Carboni M. G., Celant A., Di Bella L., Di Rita F., Frezza V., Magri D., Pichezzi R. M., Ricci V. (2013). *The transition from wave-dominated estuary to wave-dominated delta: the Late Quaternary stratigraphic architecture of Tiber River deltaic succession (Italy).* Sediment Geol 284–285:159–180.

Milli S., Mancini M., Moscatelli M., Stigliano F., Marini M., Cavinato G. (2016). *From river to shelf, anatomy of a high-frequency depositional sequence: the Late Pleistocene to Holocene Tiber depositional sequence*. Sedimentology 63:1886–1928.

Murray J. W. (2006). *Ecology and applications of Benthic Foraminifera*. Cambridge University Press, Cambridge.

Salminen R., Tarvainen T., Demetriades A., Duris M., Fordyce F. M., Gregorauskiene V., Kahelin H., Kivisilla J., Klaver G., Klein H., Larson J. O., Lis J., Locutura J., Marsina K., Mjartanova H., Mouvet C., O'Connor P., Odor L., Ottonello G., Paukola T., Plant J. A., Reimann C., Schermann O., Siewers U., Steenfel A., Van der Sluys J., De Vivo B., Williams L. (1998). *FOREGS geochemical mapping field manual: Geological Survey of Finland*. Guide Espoo, 47:1–42.

Schönfeld J. (2002). *Recent benthic foraminiferal assemblages in deep high-energy environments from the Gulf of Cadiz (Spain).* Mar Micropaleontol 44:141–162.

Schönfeld J., Alve E., Geslin E., Jorissen F., Korsun S., Spezzaferri S., Members of the FOBIMO Group (2012). *The FOBIMO (FOraminiferal BIo-MOnitoring) initiative—towards a standardized protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies*. Mar Micropaleontol 94–95:1–13.

SECOA (2009–2013). *7th Framework Program European Project Solutions for Environmental Contrasts in Coastal Areas*. https: //www.proje ctsec oa.eu

Sgarrella F., Moncharmont Zei M. (1993). *Benthic foraminifera of the Gulf of Naples (Italy): systematics and autoecology.* B Soc Paleontol Ital 32:145–264.

Tarragoni C., Bellotti P., Davoli L., Raffi R., Lupia Palmieri E. (2014). *Assessment of coastal vulnerability to erosion: the case of Tiber River Delta (Tyrrhenian Sea, Central Italy).* IJEGE 14(2):5–16.

Uffenorde H. (1972). Ökologie und jahr*eszeitliche Verteilung rezenter benthonischer Ostracoden des Limski Kanal bei Rovinj (nördliche Adria) (No. 13).* PhD thesis, Geologisch-paläontologisches Institut der Georg-August-Universität.

Valls L., Rueda J., Mesquita-Joanes F. (2013). *Dynamics of Ostracoda (Crustacea) assemblages in a Mediterranean pond system (Racó de l'Olla, Albufera Nat. Park) with focus on the exotic species Candonocypris novaezelandiae (Baird, 1843).* Int. J. Limn. 49(3):237–247.

Walton W. R. (1952). *Techniques for recognition of living foraminifera*. Contr Cushman Found Foramin Res 3:56–60.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia Letizia Di Bella per le informazioni e le immagini fornite relativamente al carotaggio TFC1.

Evoluzione storica e recente delle coste della Regione Marche (Italia centrale adriatica)

Historical and recent evolution of the shores in the Marche Region (Adriatic side of Central Italy)

Carlo Bisci[1], Gino Cantalamessa[1], Federico Spagnoli[1,2], Mario Tramontana[3]

[1] Università degli Studi di Camerino – Scuola di Scienze e Tecnologie
[2] IRBIM-CNR Ancona
[3] Università degli Studi di Urbino Carlo Bo – Dipartimento di Scienze Pure e Applicate

E-mail: carlo.bisci@unicam.it (C. Bisci), federico.spagnoli@cnr.it (F. Spagnoli), mario.tramontana@uniurb.it (M. Tramontana)

Parole chiave: Regione Marche, dinamica costiera, impatto antropico
Key words: Marche Region. Coastal dynamics, anthropogenic impact

RIASSUNTO

Il litorale marchigiano (Italia centrale adriatica) si estende per circa 172 chilometri ed è in massima parte costituito da spiagge ghiaiose e/o sabbiose orientate verso NE nella porzione settentrionale e verso ESE in quella meridionale, a loro volta separate dal promontorio del M. Conero, in cui prevalgono falesie attive e *pocket beaches*.

Quasi senza eccezioni, la costa risulta essere assai fortemente modificata da azioni antropiche dirette e indirette, mostrando una serie quasi continua di opere di protezione rigide: pennelli, moli, barriere emerse e soffolte e massicciate aderenti. Questi interventi sono stati realizzati soprattutto a partire dagli anni '60 dello scorso secolo per contrastare l'arretramento della linea di riva conseguente una forte diminuzione dell'apporto fluviale di sedimenti.

Quest'ultimo fenomeno, a sua volta, è derivato da un insieme di fattori umani intervenuti nei bacini idrografici – quali l'escavazione di inerti negli alvei fluviali, la costruzione di dighe e briglie, l'abbandono di coltivazioni ecc. – che hanno invertito la tendenza alla progradazione che, dopo fasi alterne legate più o meno direttamente a variazioni climatiche, aveva caratterizzato il periodo precedente.

Purtroppo, la mancanza di un'adeguata pianificazione territoriale e di studi approfonditi sulla dinamica costiera locale ha fatto sì che le opere di protezione di cui sopra piuttosto che risolvere il problema abbiano in genere sortito l'effetto di trasferire sotto flutto, ovvero verso nord, i fenomeni erosivi, spingendo così a costruire nuove opere ingegneristiche ad inseguire l'arretramento fino a ricoprire la massima parte del litorale che risulta quindi quasi ovunque artificiale e irrigidito.

INTRODUZIONE

Il litorale delle Marche (Italia centrale adriatica) si estende per circa 172 chilometri, di cui circa 144 di spiagge sabbiose e/o ghiaiose, più ampi di fronte alle valli alluvionali, e 28 di coste alte con *pocket beaches* (CNR-MURST, 1997; Dramis *et al.*, 2011).

Procedendo da nord a sud vi si possono riconoscere tre unità morfodinamiche principali (Fig. 1):

1) Le coste prevalentemente basse (con l'eccezione delle falesie del San Bartolo) a nord del porto di Ancona (circa 97 km), orientate all'incirca verso nordest;
2) Le falesie e le *pocket beaches* del promontorio del Monte Conero (circa 19 km), con orientamento variabile ma prevalentemente ancora verso nordest;
3) Le coste basse della costa cosiddetta "picena", più a sud (circa 56km), orientate all'incirca verso est-nordest.

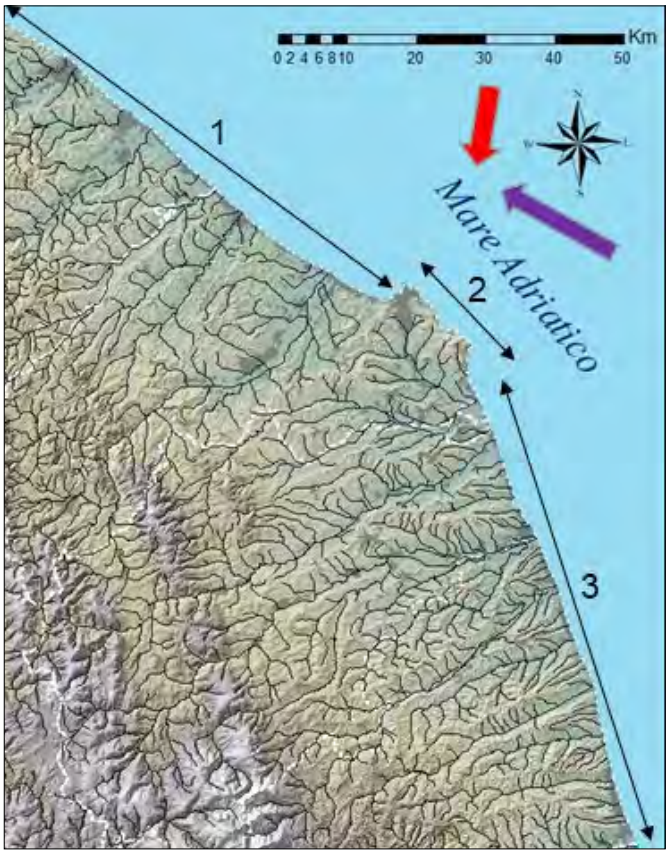


Figura 1. Unità morfodinamiche principali riconosciute lungo il litorale marchigiano e direzioni di provenienza del mare dominante (in rosso) e regnante (in viola).

Data la sua conformazione, il litorale marchigiano è esposto alle mareggiate provenienti dai primi due quadranti. In particolare, si può individuare lo scirocco, cha ha il massimo *fetch,* come mare regnante (ovvero come direzione di provenienza delle mareggiate più frequenti) e la bora, che presenta le maggiori velocità del vento, come mare dominante, ovvero come la direzione di provenienza delle mareggiate più intense, in occasione delle quali le onde superano spesso i 2 metri di altezza, ma solo molto raramente i 5 metri (APAT, 2004; Acciarri *et al., 2016;* Bisci *et al*., 2021a)

Praticamente irrilevante per l'evoluzione morfologica dei litorali, ma non per la distribuzione degli inquinanti, è invece il ruolo giocato dalle maree, che nell'Adriatico tipicamente ruotano intorno a un nodo anfidromico ubicato al largo del promontorio del Conero e la cui massima ampiezza sfiora i 60 cm con una media intorno al mezzo metro (Bisci *et al*., 2021a).

Il ripascimento naturale dei litorali, e quindi la loro tendenza evolutiva, dipende quasi esclusivamente dall'apporto solido dei principali fiumi marchigiani, tutti a regime praticamente torrentizio, tra i quali solo il Tronto ha un bacino che supera i 1000 kmq. Il clima d'onda locale è tale da far prevalere il trasporto di sedimenti lungo costa da sud verso nord (Acciarri *et al.*, 2016; Bisci *et al.*, 2021b).

Tutti i principali corsi d'acqua che sfociano lungo il litorale adriatico marchigiano si originano lungo le pendici prevalentemente calcaree dell'Appennino Umbro-Marchigiano e scorrono per la maggior parte del proprio corso sui termini terrigeni più recenti che formano il Bacino Marchigiano Esterno (Fig. 2). Questi ultimi, essendo prevalentemente pelitici, non riescono però a contribuire in modo davvero efficace al ripascimento naturale delle spiagge (Bisci *et al*., 2021b).

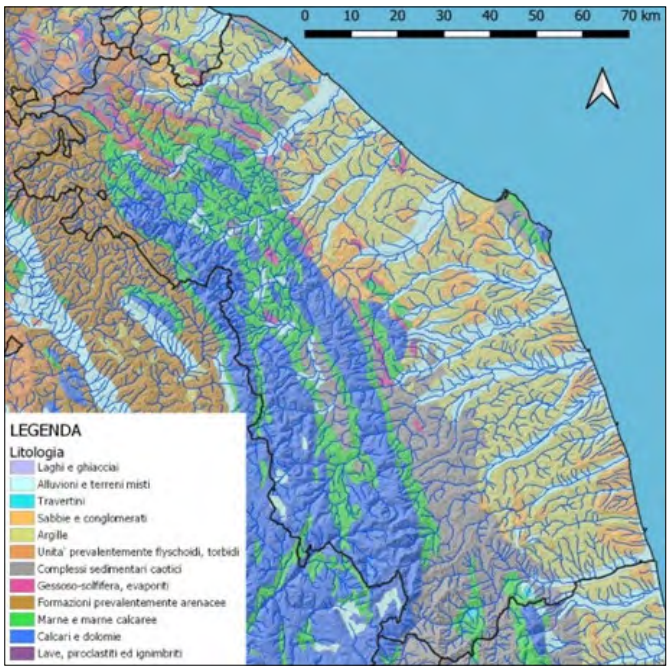


Figura 2. Schema litologico dell'area marchigiana.

EVOLUZIONE STORICA

Dopo le prime emersioni della catena appenninica Umbro-Marchigiana che hanno segnato la formazione del Mare Adriatico, la costa di questa porzione del territorio italiano è via via avanzata in conseguenza del lento sollevamento tettonico. Questo complessivo avanzamento, però, ha subito fasi alterne in funzione delle variazioni climatiche passate, divenendo più veloce durante le fasi fredde in cui il livello del mare si abbassava e mostrando una tendenza inversa durante quelle calde, come l'attuale (Bisci *et al*., 2021b).

Durante l'ultimo massimo glaciale del Würm (circa 20'000 anni fa) il livello del mare era circa 120 m più basso rispetto ad oggi e l'area marchigiana era caratterizzata da condizioni climatiche fredde e aride, proseguite fino alla fine del Pleistocene, che inducendo condizioni di resistasia favorivano l'erosione areale dei rilievi emersi e il conseguente accumulo di sedimenti nelle basse valli (Acciarri *et al., 2016;* Bisci *et al*., 2021b).

Dopo aver attraversato la sua piana attuale, il Po deviava verso sud sulla pianura alluvionale rappresentata dalla vasta piattaforma Adriatica e la attraversava divagando, per terminare poi in un delta di *lowstand* ubicato sul margine settentrionale della Depressione Meso-Adriatica, pochi chilometri a sud del litorale in questione (Fig. 3).

Figura 3. Ricostruzione della condizione della penisola italiana durante gli ultimi massimi glaciali.

L'Adriatico settentrionale era quindi completamente emerso e rappresentava il prolungamento verso sudest della Pianura Padana (Damiani, 1975; Ferretti *et al*., 1986; Bisci e Dramis, 1991; Coltorti, 1991; Trincardi e Correggiari, 2000; Ridente e Trincardi, 2006; Storms *et al*., 2008; Dinelli *et al*., 2013; Spagnoli *et al*.,2014; Trincardi *et al*., 2014; Acciarri *et al.*, 2016; Bisci *et al*., 2021b). I fiumi delle Marche che attualmente sfociano nel Mare Adriatico erano quindi tutti affluenti di destra del fiume Po e contribuivano

a depositare nel bacino dell'attuale Mare Adriatico estesi corpi di sedimentari.

Durante l'Olocene, il progressivo miglioramento climatico (il cosiddetto "Optimum Climatico Olocenico") ha determinato sia la risalita del livello marino (trasgressione Flandriana, fino a circa 6'000 anni B.P., con velocità di 0,5 – 1,5 cm/anno), sia, a seguito dell'aumento della copertura vegetale, una riduzione del carico solido dei fiumi. I tratti terminali delle precedenti valli fluviali sono stati quindi sommersi, dando luogo a *rias*, con alla testa *pocket beaches* sabbioso-ghiaiose, che si alternavano a estese falesie attive (Speranza, 1934; Buli e Ortolani, 1947; Bisci e Dramis, 1991; Coltorti, 1991, 1997; D'Alessandro *et al*., 2001; Coltorti e Farabollini, 2008; Gasparini e Tabacchi, 2011; Miccadei *et al*., 2011; Acciarri *et al*., 2016; Bisci *et al*., 2021b).

La prima progradazione storica della linea di riva marchigiana si è verificata durante l'Epoca Romana, nonostante il clima caldo e umido, in conseguenza dell'intensa deforestazione avvenuta durante le Età del Bronzo e, prevalentemente, del Ferro (Calderoni *et al*., 1989). Difatti, fino al primo secolo A.D. la sempre crescente pressione antropica – risultante in una più diffusa agricoltura e in un aumento della deforestazione sia a scopi agricoli, sia per la richiesta di legno – ha indotto una maggiore erosione del suolo e, quindi, un aumento di trasporto di sedimenti al mare con conseguente avanzamento della linea di riva (Vita-Finzi, 1969; Bisci e Dramis, 1991; Coltorti, 1991; Pranzini,1994; Williams, 2000; Hughes, 2011; Acciarri *et al*., 2016; Bisci *et al*., 2021b). Dopo aver riempito i loro estuari, i fiumi spesso iniziarono quindi ad accrescersi verso mare, formando sistemi spiaggia-laguna (Ortolani e Alfieri, 1978; Coltorti, 1991; Bisci *et al*., 2021a). La linea di costa era ubicata, rispetto ad oggi, a diverse centinaia di metri nell'entroterra, come testimoniato da molti ritrovamenti archeologici. (Speranza, 1934; Alfieri *et al*., 1966; Coltorti, 1997; Galiè, 2001; Acciarri *et al*., 2016; Bisci *et al*., 2021b),

Tra il 400 e il 750 A.D. il clima meno favorevole (Fig. 4), unitamente all'in parte connesso declino progressivo della civiltà, ha determinato un forte spopolamento con conseguente abbandono dei terreni coltivati, che ha comportato una significativa espansione delle foreste, segnando l'inversione del *trend* progradazionale (Pranzini, 2001; Materazzi *et al*., 2010; Bisci *et al*., 2021b).

Il clima più caldo e più umido (Fig. 4) che in seguito iniziò a prevalere (*Medieval Climatic Optimum*, intorno al 1100 A.D.) ha poi portato a un nuovo rapido aumento di popolazione, con nuovo forte sviluppo dell'agricoltura e deforestazioni molto diffuse (Pranzini, 1989; Coltorti, 1997; Williams, 2000; Abulafia, 2004; Bisci *et al*., 20121b), per cui dapprima le foci fluviali e quindi le coste hanno ripreso ad avanzare ((Pranzini, 1994; Coltorti, 1997; Materazzi *et al*., 2010; Acciarri *et al*., 2016). Bisci *et al*., 2021b).

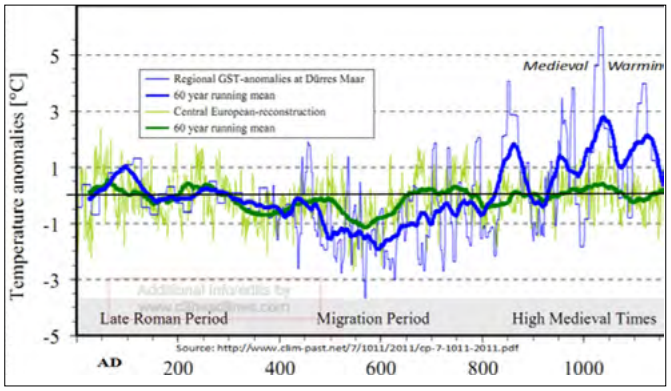


Figura 4. Andamento delle temperature dal I al XIII secolo.

La progradazione delle linee di costa è proseguita fino a quando una nuova fase fredda – la Piccola Età Glaciale, generalmente collocata all'inizio del XIV secolo (Ladurie, 2004; Fig. 5) – ha iniziato a causa della minore produttività agricola a ridurre la popolazione, che è poi stata dimezzata dalla "peste nera" del 1363 (Fig. 5). In conseguenza di ciò, molte attività agricole sono state abbandonate e le foreste hanno iniziato nuovamente a espandersi, inducendo una diminuzione dell'erosione areale dei versanti – e, quindi, della velocità di avanzamento delle foci fluviali e delle spiagge – nonostante il peggioramento climatico ((Materazzi *et al*., 2010; Acciarri *et al*., 2016). Bisci *et al*., 2021b).

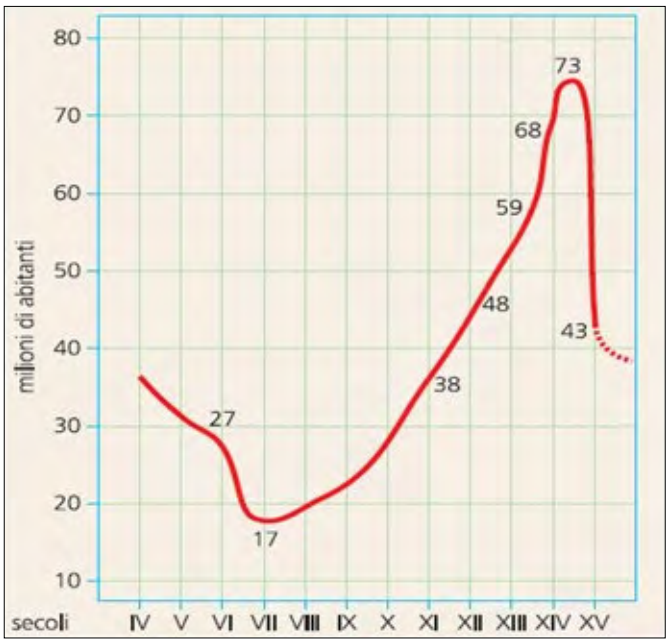


Figura 5. Andamento demografico in Europa dall'XI al XVI secolo.

Successivamente, la popolazione lentamente ha ripreso a crescere: gli abitanti della regione Marche sono aumentati da circa 400'000 unità, alla fine del XIV secolo, a 710'000 unità all'inizio del XIX secolo; questo incremento si è associato con la diffusione di un nuovo sistema di suddivisione dei terreni, con contratti di mezzadria che hanno favorito l'aumento delle coltivazioni a discapito della copertura forestale (Arzeni *et al., 2012)*.

Tra il XV e il XVIII secolo, la stabilità politica e territoriale ha fatto sì che l'area marchigiana divenisse uno dei più importanti "granai" dell'Italia centrale e, al fine di far crescere grano e viti, è stata realizzata un'intensa deforestazione. Tutto ciò, insieme con la pratica dell'aratura a rittochino, ha portato a un aumento dell'apporto solido fluviale alle coste, che hanno quindi conosciuto una notevole progradazione, soprattutto nei pressi delle foci (Pranzini, 1995; Acciarri *et al*., 2016; Bisci *et al*., 2021b; Fig. 6).

Figura 6. Rappresentazioni di tratti della costa marchigiana meridionale dipinti nel 1677.

EVOLUZIONE RECENTE E ATTUALE

Il primo forte impatto diretto dell'uomo sui litorali marchigiani si è avuto con la costruzione della ferrovia adriatica (1862-1863). Questa, tranne che alle spalle delle coste alte, corre infatti a brevissima distanza dalla linea di costa, spesso sopra la linea delle dune costiere che al tempo erano molto diffuse lungo tutto il litorale. A causa della sua posizione, la linea ferroviaria fu spesso protetta dalle mareggiate con massicciate aderenti, che oltre a irrigidire la costa disturbavano la naturale deriva dei sedimenti (Bisci *et al*., 2021b).

Un ulteriore fonte contemporanea di disturbo antropico della dinamica dei litorali derivò dai primi programmi nazionali di riforestazione e dalla costruzione delle prime strutture portuali, con moli che intercettavano la deriva dei sedimenti causando accumuli sotto flutto e innescando fenomeni erosivi sopra flutto (Arzeni *et al*., 2012; Bisci *et al*., 2021b).

Dai primi decenni del '900 sono state poi realizzate le prime dighe per bacini idrici per la produzione di elettricità (Fig. 7), come quella sul Fiume Candigliano, completata nel 1922, e quelle lungo il corso superiore di alcuni bacini fluviali (Tronto e Chienti), messe in opera tra il 1900 e il 1920 (Bisci *et al*., 2021b). In particolare, la diga sul fiume Candigliano può essere ritenuta la causa determinante per una prima diminuzione dell'apporto solido alla foce del fiume Metauro, mentre all'assenza di questo tipo di opere è invece legata la stabilità della foce del fiume Cesano (Bisci *et al*., 1992; Materazzi *et al*., 2010; Giacopetti *et al*., 2015; Bisci *et al*., 2021b).

Durante la prima metà del XX secolo, inoltre, furono realizzati lavori di controllo idraulico, costruendo le prime briglie e, soprattutto, argini per rettificare i fiumi, principalmente lungo il loro corso mediano-finale, che contribuirono a modificare in modo sensibile la velocità del flusso dell'acqua, così come le sue capacità di erosione e trasporto (Bisci *et al*., 2021b).

Confrontando tramite strumenti GIS la posizione delle linee di riva rilevate a partire dalla cartografia ufficiale disponibile per gli anni 1894 e 1948 (Figg. 8 e 9), si può

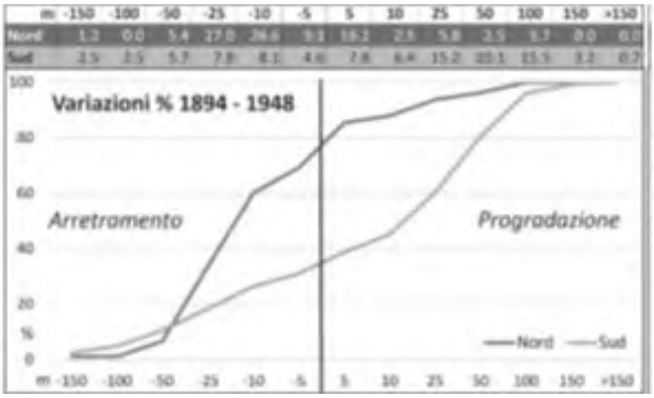


Figura 8. Variazioni della linea di riva intercorse tra il 1894 e il 1948 nei due settori principali della Regione.

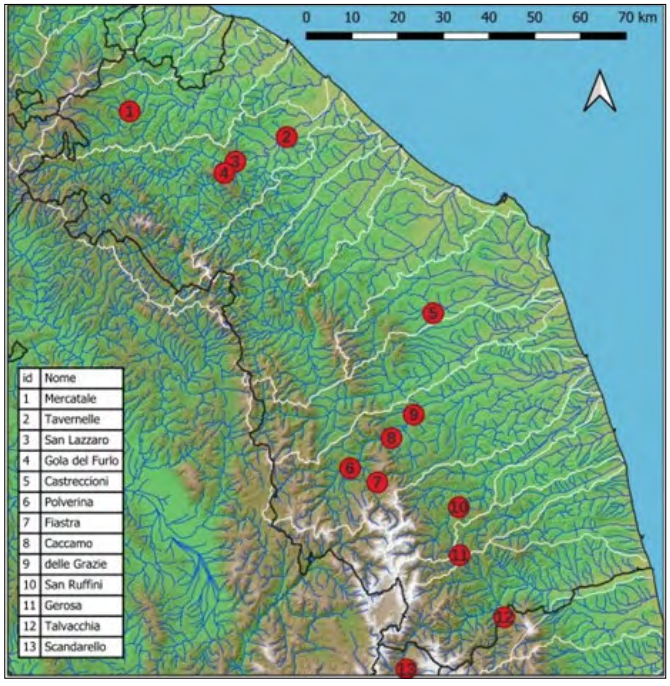


Figura 7. Ubicazione delle principali dighe realizzate lungo i bacini idrografici delle Marche.

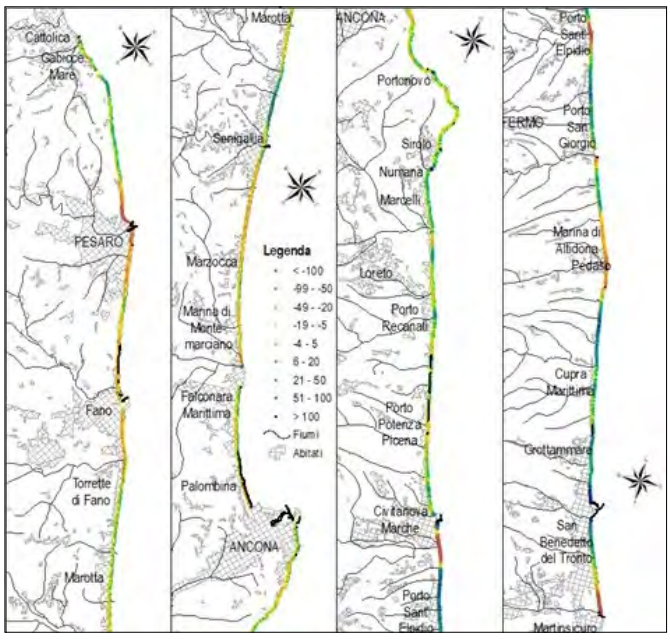


Figura 9. Distribuzione delle variazioni della linea di riva intercorse tra il 1894 e il 1948 e opere di difesa (in nero).

evincere che nel complesso, il settore nord mostra una più generalizzata tendenza all'arretramento rispetto alla costa «Picena», dove però si sono comunque avuti fenomeni particolarmente intensi, come in sinistra del Tronto, in conseguenza della costruzione di un pennello sulla sponda opposta che ha bloccato la naturale deriva dei sedimenti verso nord (Bisci *et al*., 2021b).

In conseguenza di questi primi fenomeni di erosione dei litorali e soprattutto, per la nuova richiesta di strutture portuali, sono state messe inoltre in atto alcune opere di difesa di diverso tipo (pennelli, massicciate aderenti e barriere), che comunque nel primo dopoguerra erano ancora scarsamente diffuse (Bisci *et al*., 2021b; Fig. 9).

Il boom economico degli anni '60 ha portato da un lato all'abbandono di coltivi, soprattutto lungo i pendii più ripidi, e dall'altro a una sempre maggiore richiesta di inerti, con conseguente enorme incremento dell'escavazione «selvaggia» dagli alvei fluviali (AQUATER, 1982; Bisci *et al*., 1992; Bisci *et al*., 2021b).

Questo, insieme all'aumento del numero di strutture fluviali (dighe e briglie), ha portato a una forte riduzione del carico solido utile dei fumi, inducendo un notevole incremento dei fenomeni erosivi lungo la costa, ancora una volta più intensi e diffusi nel settore settentrionale della Regione (Acciarri *et al*., 2016; Bisci *et al*., 2021b; Figg. 10 e 11).

Dato anche il forte incremento degli interessi economici connessi con il turismo balneare – che ha portato alla realizzazione di strade lungomare in genere al di sopra delle dune costiere residue (e comunque a breve distanza dalla battigia) e all'edificazione di strutture sopra la spiaggia emersa – molte nuove opere di difesa di diverso tipo hanno quindi continuato a essere costruite un po'ovunque (Acciarri *et al*., 2016; Bisci *et al*., 2021b; Fig. 11).

Purtroppo, però, questi interventi sono in genere stati di tipo estemporaneo e non avevano alla base un serio studio della dinamica marina locale, per cui in gran parte dei casi si sono limitati a risolvere (spesso solo parzialmente) il problema locale ma bloccando la naturale deriva dei sedimenti hanno anche trasferito i fenomeni di erosione sottoflutto, non di rado anche amplificandoli (Bisci *et al*., 2021b).

L'ultimo periodo del secolo scorso ha mostrato una diminuzione dell'entità e della diffusione dei fenomeni di arretramento dei litorali, grazie anche al divieto di escavazione in alveo, dove spesso si era ormai raggiunto il substrato prevalentemente pelitico al di sotto del materasso

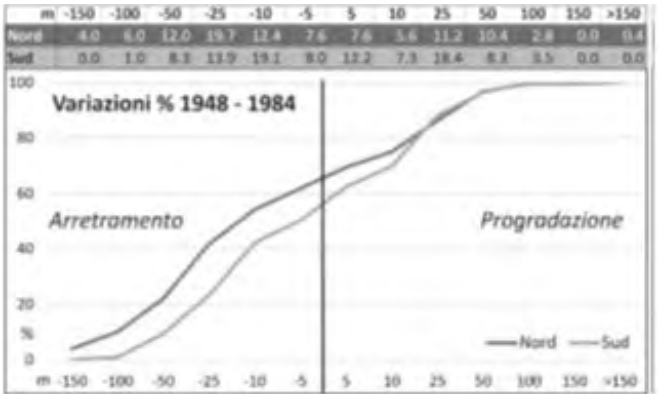


Figura 10. Variazioni della linea di riva intercorse tra il 1948 e il 1984 nei due settori principali della Regione.

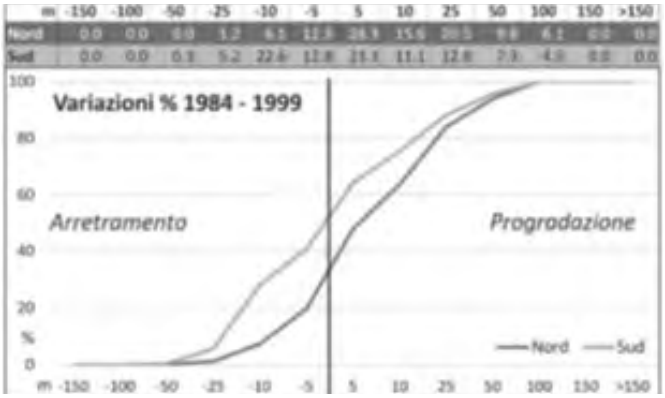


Figura 12. Variazioni della linea di riva intercorse tra il 1984 e il 1999 nei due settori principali della Regione.

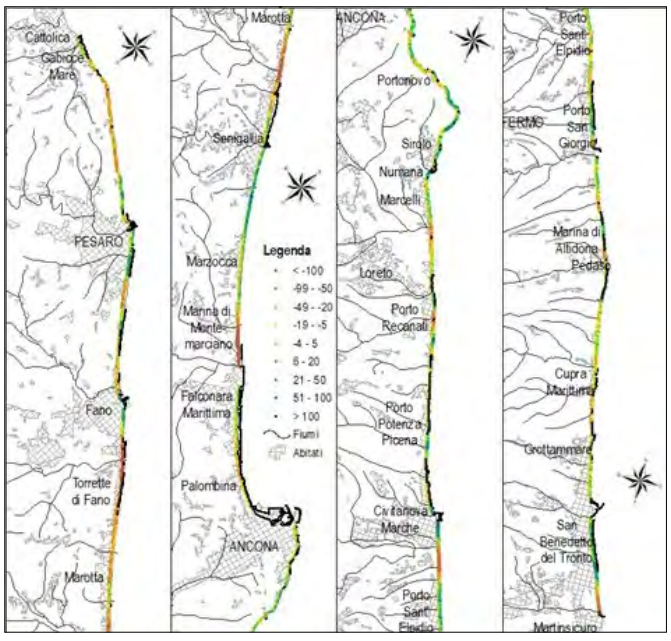


Figura 11. Distribuzione delle variazioni della linea di riva intercorse tra il 1948 e il 1984 e opere di difesa (in nero).

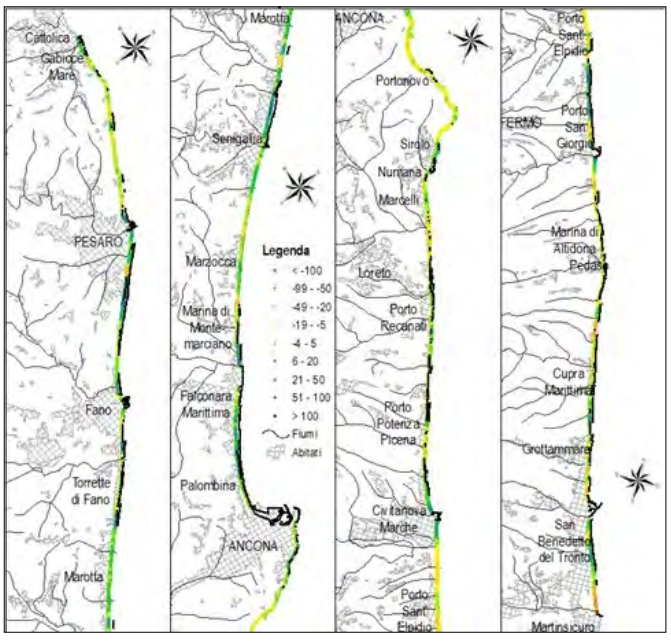


Figura 13. Distribuzione delle variazioni della linea di riva intercorse tra il 1984 e il 1999 e opere di difesa (in nero).

alluvionale (Bisci *et al*., 1992; Acciarri *et al., 2016;* Bisci *et al*., 2021b).

Questa variazione di tendenza è particolarmente evidente nel settore settentrionale, dove circa due terzi della costa risulta stabile o in debole progradazione (Bisci *et al*., 2021b; Figg. 12 e 13).

Questo miglioramento del trend evolutivo delle coste dipende però anche dall'incremento delle opere di vario tipo che hanno pesantemente irrigidito la linea di riva, rendendola artificiale in gran parte della Regione (Bisci *et al*., 2021b; Fig. 13).

Nell'ultimo ventennio, la situazione è leggermente migliorata nel settore meridionale (dove circa il 60% della costa non è più in erosione) ma è leggermente peggiorata nel settore nord, dove solo poco più della metà del litorale risulta stabile o in leggera progradazione (Bisci *et al*., 2021b; Figg. 14 e 15).

La situazione in genere quasi stabile del litorale marchigiano è stata però raggiunta tramite irrigidimento di buona parte della costa tramite opere ingegneristiche che nel tempo si sono susseguite a rincorrere la progressiva migrazione lungo flutto dei fenomeni erosivi (Fig. 15).

Permangono comunque situazioni locali ampiamente critiche, legate soprattutto al deleterio effetto di opere trasversali (foci armate e pennelli) che bloccano il naturale trasporto lungo costa dei sedimenti, come è particolarmente evidente nei casi di Porto S. Elpidio e della Riserva Naturale Regionale della Sentina.

Piuttosto rari sono invece i casi in cui si è intervenuto in modo «morbido», tramite ripascimenti artificiali, peraltro spesso inadeguati per quantità e/o granulometria (Bisci *et al*., 2021b).

Per quanto riguarda la granulometria dei materiali di spiaggia, se da un lato la tendenza all'arretramento ha comportato una generalizzata crescita delle dimensioni medie dei clasti, dall'altro la realizzazione di opere di difesa rigide ha comportato un aumento locale della percentuale di materiali fini, a volte anche limosi alle spalle delle barriere emerse dove non sono rari i fenomeni di tombolizzazione (Bisci *et al*., 2021b).

La naturalità dei litorali marchigiani oltre a soffrire per l'edificazione sulle spiagge e per l'irrigidimento artificiale della linea di riva è anche alterata dalla ormai quasi totale scomparsa delle dune costiere (Fig. 16), un tempo onnipresenti, che al di là degli importanti aspetti paesaggistici e naturalistici rappresentavano un'impor-tante protezione dalle mareggiate per l'immediato entroterra (Bisci *et al*., 2021c; in stampa).

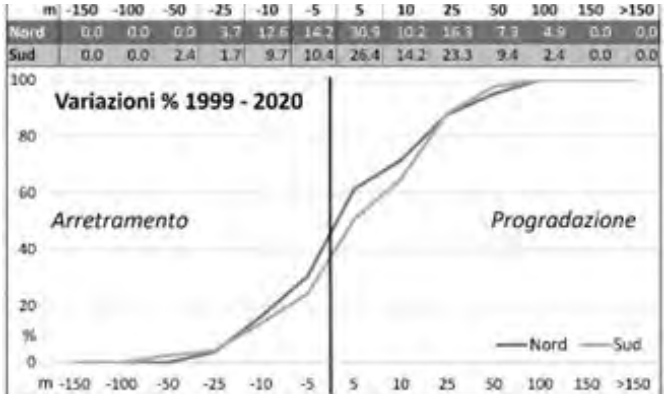


FIGURA 14. Variazioni della linea di riva intercorse tra il 1999 e il 2020 nei due settori principali della Regione.

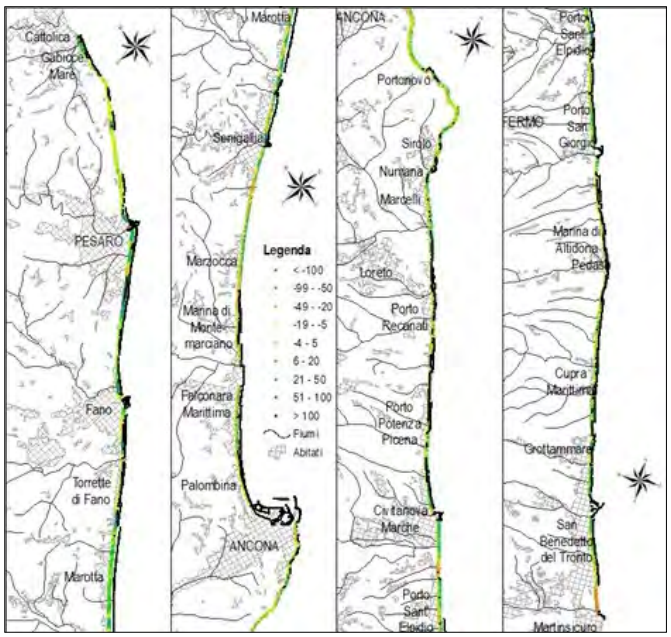


FIGURA 15. Distribuzione delle variazioni della linea di riva intercorse tra il 1999 e il 2020 e opere di difesa (in nero).

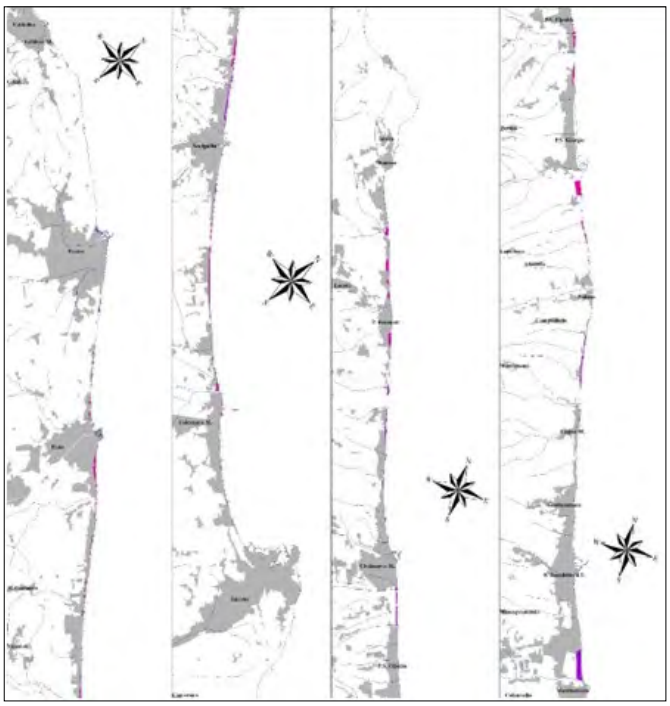


FIGURA 16. Aree dunali alterate e aree poco antropizzate (in rosso).

FIGURA17. Vista aerea di una porzione rappresentativa delle coste alte e delle *pocket beaches* del Promontorio del M. Conero.

Completamente diversa è l'evoluzione delle coste alte del Conero, caratterizzata dalla presenza di imponenti falesie attive con alla loro base *pocket beaches* (Fig. 17) in cui l'apporto fluviale di sedimenti è pressoché nullo e i detriti derivanti dall'evoluzione per frana delle pareti erose alla base dal moto ondoso tendono soprattutto a oscillare verso nord o verso sud in funzione delle direzioni di provenienza delle varie mareggiate, pur mostrando una generalizzata tendenza all'arretramento.

CONCLUSIONI

Dall'analisi dell'evoluzione storica del litorale marchigiano emerge come fino all'espansione demografica dell'Epoca romana il clima, combinato con il lento sollevamento tettonico, determinava direttamente le variazioni di andamento della dinamica costiera, con linee di rive che avanzavano nei periodi a clima più freddo e arretravano quando il clima migliorava.

In seguito, l'uomo è diventato il principale agente morfogenetico (anche se in qualche modo dipendente dalle condizioni climatiche), aumentando la produzione dei detriti lungo i versanti, e quindi facendo progradare le coste, quando la richiesta di legna e produzione agricola aumentava e consentendo invece loro di arretrare quando le foreste erano lasciate libere di espandersi.

A partire dalla fine del XIX secolo l'influenza antropica si è fatta via via sempre più rilevante e un picco particolare lo si è avuto a partire dagli anni '60 dello scorso secolo, quando in risposta al boom economico è aumentata la richiesta di inerti, di energia elettrica e di mano d'opera per le industrie e il terziario. Di conseguenza, i fiumi hanno sensibilmente ridotto il proprio carico solido, inducendo fenomeni di erosione costiera localmente molto intesi che hanno portato alla costruzione di opere di difesa costiera rigide. Queste ultime, a causa di carenza di pianificazione e studi dettagliati sulla dinamica costiera locale, molto spesso invece di risolvere i problemi hanno prodotto una migrazione sotto flutto dei fenomeni erosivi, portando così ne tempo alla costruzione di un numero sempre maggiore di pennelli e barriere costruiti a inseguire i fenomeni di arretramento costiero, che hanno finito per irrigidire la linea di costa, rendendola nel complesso artificiale.

Concludendo, senza voler in alcun modo sminuire l'importanza di una seria progettazione ingegneristica e realizzazione delle opere di difesa, si sottolinea come sia fondamentale che queste seguano le indicazioni di un Geologo esperto nella dinamica costiera in grado di definire in dettaglio, tramite rilevamenti e monitoraggi di medio termine (almeno un anno) associati a un serio studio del clima d'onda locale, le caratteristiche sedimentologiche e geomorfologiche locali del litorale e le loro tendenze evolutive a breve e medio termine.

Altrimenti, anche opere perfettamente progettate e realizzate rischiano di creare più problemi di quanti ne risolvano, come dimostrato ampiamente dalla progressiva crescita del numero e dell'estensione di tali interventi, messi in opera di volta in volta per risolvere i problemi derivanti da quelli precedentemente realizzati.

BIBLIOGRAFIA

Abulafia D. (2004). *Italy in the Central Middle Ages*. OUP Oxford, 299 pp.

Acciarri A., Bisci C., Cantalamessa G., Di Pancrazio G. (2016). *Anthropogenic influence on recent evolution of shorelines between the Conero Mt. and the Tronto R. mouth (southern Marche, Central Italy)*. Catena, 147, 545-555.

APAT (2004). *Atlante delle Coste. Il moto ondoso a largo delle coste italiane*. http://www.isprambiente.gov.it/it/servizi-per-lambiente/stato-delle-coste/atlante-delle-coste.

AQUATER (1982). *Studio generale per la difesa delle coste: Prima fase*. Aquater, S. Lorenzo in Campo (PU), 706 pp.

Aringoli D., Bisci C., Cantalamessa G., Di Celma C.n., Farabollini P., Gentili B., Materazzi M., Pambianchi G. (2003). *Recent variations of central Adriatic coastline*. In: CERG, *Geomorphological Sensitivity and Systems Response*, 13–20.

Arzeni A., Bolognini T., Cortonesi A., Montresor A., Moscatelli U., Giorda M.c., Piermattei A., Romano R., Marongiu S. (2012). *Fonte Avellana: dall'agricoltura medioevale alla moderna multifunzionalità rurale*. Osservatorio Foreste INEA, 253 pp.

Bisci C., Cantalamessa G., De Marco R., Spagnoli F., Tramontana M. (2021a). *Caratteri oceanografici dell'Adriatico centro-settentrionale e della costa Marchigiana*. Studi Costieri, 30, 7 – 12.

Bisci C., Cantalamessa G., Spagnoli F., Tramontana M. (2021). *Evoluzione storica e attuale del litorale delle Marche*. Studi Costieri, 30, 13 – 34.

Bisci C., Cantalamessa G., Casavecchia S., Gasparri R., Pesaresi S., Spagnoli F., Scalella G., Tramontana M., Zitti S., Parlani S., Sinigaglia M., Forchielli G., Mazzoli F., Magnoni D., Bellino C., Pernini D. (2021c). *Protezione e valorizzazione delle dune costiere residue nelle Marche.* Studi Costieri, 30, 93–144.

Bisci C., Cantalamessa G., Casavecchia S., Spagnoli F., Tramontana M. (in stampa). *Coastal dunes along the Marche littoral (adriatic side of Central Italy)*. Proc. Syomp. Mediterranean Coastal Areas.

Bisci C., Dramis F. (1991). *La geomorfologia delle Marche*. In: AA.VV., *L'ambiente fisico delle Marche*, Firenze, SELCA, 81–113.

Bisci C., Dramis F., Gentili B. (1992). *Recent and present geomorphological evolution of river beds in the southern portion of the Marche region (Central Italy)*. Geoöko Plus, 3, 83–96.

Buli U., Ortolani M. (1947). *Le spiagge marchigiane*. Coop, Tipografica Azzoguidi, Bologna (151 p).

Calderoni G., Coltorti M., Consoli M., Farabollini P., Dramis F., Pambianchi G., Percossi E. (1989). *Degradazione dei versanti e sedimentazione nei pressi di Borgiano (Appennino marchigiano) durante l'Olocene recente*. Atti Conv." Morfogenesi e stratigrafia dell'Olocene". Mem. Soc. Geol. It., 42, 301–310.

CNR - MURST (1997). *Atlante delle spiagge italiane. Dinamismo, tendenza evolutiva, opere umane*. Edit. SELCA Firenze, 108 fogli 1:10000.

Coltorti M. (1991). *Modificazioni morfologiche oloceniche nelle piane alluvionali marchigiane: alcuni esempi nei fiumi Misa, Cesano e Musone*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 14, 73–86

Coltorti M. (1997). *Human impact in the Holocene fluvial and coastal evolution of the Marche region, Central Italy*. Catena, 30, 311–335.

Coltorti M., Farabollini P. (2008). *Late Pleistocene and Holocene fluvial–coastal evolution of an uplifting area:the Tronto River (Central Eastern Italy)*. Quatern. Int., 189, 39–55.

D'alessandro L., Genevois R., Marino A. (2001). *Dinamica recente della costa alta fra Ortona e Vasto (Abruzzo centro-meridionale)*. Mem. Soc. Geol. It., 56, 53–60.

Dinelli E., Gosh A., Rossi V., Vaiani C.v. (2013). *Multiproxy reconstruction of Late Pleistocene- Holocene environmental changes in coastal successions: microfossil and geochemical evidences from the Po Plain (Northern Italy)*. Stratigraphy, 9 (2), 153–167.

Dramis F., Aringoli D., Bisci C., Cantalamessa G., Coltorti M., Farabollini P., Gentili B., Materazzi M., Nesci O., Pambianchi G., Pierucci-ni P., Savelli D., Troiani F. (2011). *La Costa delle Marche*. In: GINESU S. (Ed.), *La Costa d'Italia*. Delfino Ed., Sassari, pp. 379–392.

Ferretti M., Moretti E., Savelli D., Stefanon A., Tramontana M., Wezel F.-C. (1986). *Late Quaternary alluvial sequences in the North-Western Adriatic Sea from uniboom profiles*. Boll. Oceanol. Teor. Appl., IV(1), 63-72.

Galiè V. (2001). *Ubicazione dei porti e del navale fermano in epoca romana e altomedievale tra il Potenza e il Tronto alla luce delle carte di Farfa e del Codice 1030*. Macerata, 70 pp.

Gasparini P., Tabacchi G. (2011). *L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC 2005. Secondo inventario forestale nazionale italiano. Metodi e risultati*. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali; Corpo Forestale dello Stato. Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Edagricole-Il Sole 24 ore, Bologna, 653 pp.

Giacopetti M., Materazzi M., Pambianchi G., Aringoli D., Farabollini P. (2015). *Geomorphological evolution of the middle-lower reach of the Tronto river (central Italy), during the last 200 years: impacts on flood hazard*. Rend. Online Soc. Geol. It., 33, 48–52.

Grove A.T. (2001). *The "Little Ice Age" and its geomorphological consequences in Mediterranean Europe*. Clim. Change, 48, 121–136.

Ladurie E.L.R. (2004). *Histoire humaine et comparée du climat, volume 1: Canicules et glaciers (XIIIe-XVIIIe siècles)*. Fayard, Paris, 739 pp.

Miccadei E., Mascioli F., Piacentini T., Ricci F. (2011). *Geomorphological features of coastal dunes along the Central Adriatic Coast (Abruzzo, Italy)*. J. Coastal Res., 27, 1122–1136.

Pranzini E. (1994). *Bilancio sedimentario ed evoluzione storica delle spiagge*. Il Quaternario, 7, 197–204.

Pranzini E. (1995). *Cause naturali ed antropiche nelle variazioni del bilancio sedimentario dei litorali*. Riv. Geogr. Ital., NS 1, 47–62.

Spagnoli F., Dinelli E., Giordano P., Marcaccio M., Zaffagnini F., Frascari F. (2014). *Sedimentological, biogeochemical and mineralogical facies of Northern and Central Western Adriatic Sea*. J Marine Sys., 139, 183–203.

Speranza G. (1934). *Il Piceno dalle origini alla fine d'ogni sua autonomia sotto Augusto*. L. Cardi, Ancona, 2v, 142 pp.

Storms J.e.a., Weltje G.j., Terra G.j., Cattaneo A., Trincardi F. (2008). *Coastal dynamics under conditions of rapid sea-level rise: Late Pleistocene to early Holocene evolution of barrier–lagoon systems on the northern Adriatic shelf (Italy)*. Quaternary Sci. Rev., 27, 1107–1123.

Tabacchi G., De Natale F., Di Cosmo L., Floris A., Gagliano C., Gasparini P., Genchi L., Tosi V. (2005). *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio: Le stime di superficie 2005. Primaparte*. MiPAF, Corpo Forestale dello Stato, Ispettorato Generale. Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura, CRA.

Trincardi F., Correggiari A. (2000). *Quaternary forced regression deposits in the Adriatic basin and the record of composite sea-level cycles*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 172, 245–269.

Trincardi F., Campiani E., Correggiari A., Foglini F., Maselli V., Remia A. (2014). *Bathymetry of the Adriatic Sea: the legacy of the last eustatic cycle and the impact of modern sediment dispersa*l. J. e Maps, 10, 151–158.

Williams M. (2000). *Dark ages and dark areas: global deforestation in the deep past*. J. Hist. Geogr., 26 (1).

Ingegneria Naturalistica per la tutela delle spiagge emerse e sommerse. Un approccio ecologico

Soil bioengineering for the protection of emerged and submerged beaches. An ecological approach

Federico Boccalaro

SIGEA Lazio
ORDING Roma Commissione Ingegneria Naturalistica (Presidente commissione)
AIPIN Lazio (Presidente sezione)

E-mail: federico.boccalaro@libero.it

Parole chiave: spiaggia, dune costiere, habitat marini, ingegneria naturalistica, ecologia
Key words: beach, coastal dunes, marine habitats, soil bioengineering, ecology

ABSTRACT

L'Ingegneria Naturalistica è un settore delle scienze delle costruzioni che persegue obiettivi tecnici, ecologici, paesaggistici ed economici, attraverso l'aggiunta prevalente di materiale da costruzione vivo (sementi, piante, parti di piante e associazioni vegetali di piante). Questi obbiettivi vengono raggiunti attraverso una tecnica costruttiva ecologica e cioè con l'utilizzo delle molteplici proprietà delle piante.

L'Ingegneria Naturalistica raggiunge così, sempre più diffusamente in ambito Mediterraneo, gli obiettivi di:

- proteggere contro i rischi idrogeologici;
- ripristinare gli habitat naturali;
- definire le specie vegetali ottimali per il loro apparato radicale;
- condividere e diffondere gli interventi.

In ambito costiero, i sistemi dune-spiagge-fondali instabili sono soggetti a erosione e forniscono un apporto di sabbia che può essere compromesso dagli eventi meteomarini e dall'impatto antropico.

La stabilizzazione del suolo con tecniche di Ingegneria Naturalistica può essere necessaria per:

- prevenire la perdita o il deterioramento di preziosi habitat naturali.
- mantenere le creste dunali, che fungono da protezione costiera per le zone interne.
- proteggere, dall'attacco dello sviluppo turistico incontrollato (calpestio, ancoraggio, ecc.) e dal consumo di suolo, la vegetazione (a psammofile e fanerogame marine) consolidatrice delle sabbie emerse e sommerse.
- consentire il rimboschimento del retroduna, la stabilizzazione dei crinali dunali e la riforestazione delle praterie di *Posidonia oceanica*.

HABITAT MARINI COSTIERI EUROPEI

L'entità della perdita di habitat marini-costieri è allarmante.

Ad oggi, meno del 15% degli habitat costieri europei può essere considerato in buone condizioni, e la situazione è ancora più drammatica per le coste italiane dove le attività dell'uomo si sono concentrate per migliaia di anni.

Ignorare queste perdite può compromettere la salute e la sostenibilità dei pochi frammenti di habitat naturali che ancora sopravvivono, con gravissime ripercussioni anche per l'industria del turismo (da Airoldi L. e Beck M., 2009).

Nei secoli l'erosione, le bonifiche, lo sviluppo costiero incondizionato, il sovrasfruttamento delle risorse della pesca e l'inquinamento hanno portato alla scomparsa di

Figura 1. Intervento di rivegetazione dunale a Cala Mesquida - Maiorca (da F. Boccalaro, 2010).

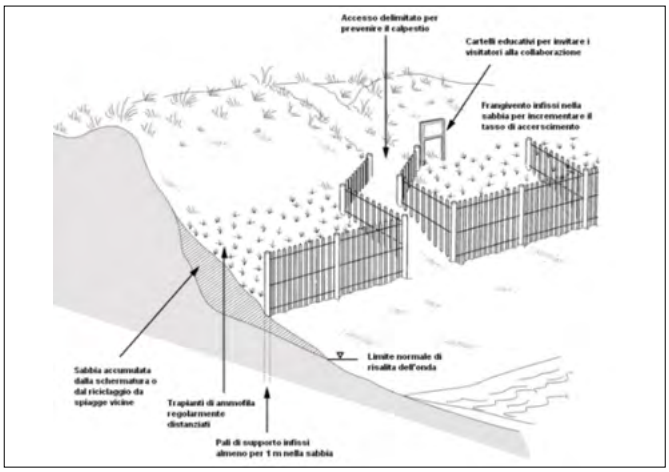


Figura 2. Accorgimenti protettivi di rivegetazioni su dune (da Scottish Natural Heritage, 2004).

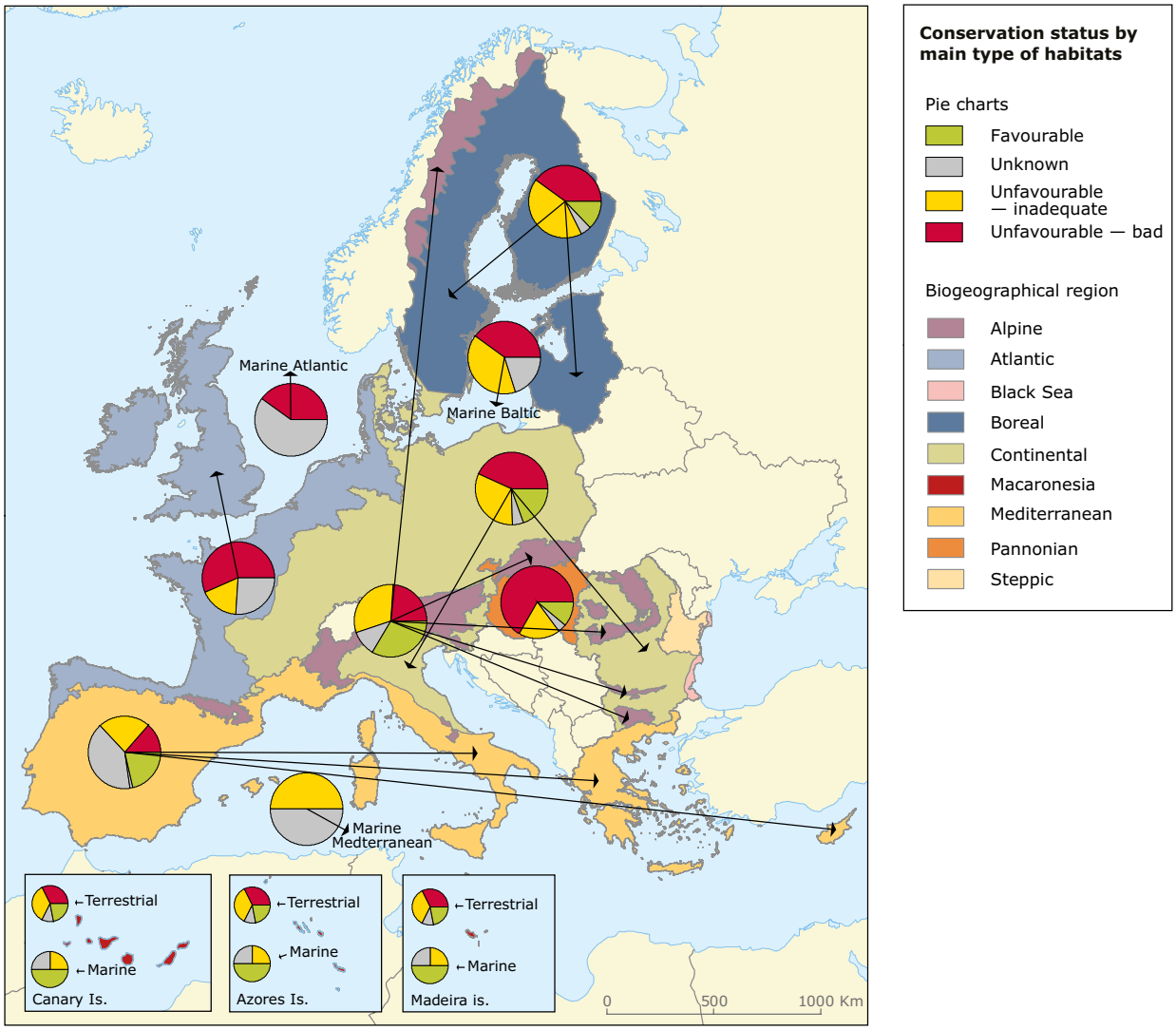


FIGURA 1. Ecosistemi europei minacciati dallo sviluppo (dall'Agenzia Europea per l'Ambiente - EEA, 2010)

vastissime porzioni di habitat costieri naturali. Tra questi le lagune costiere, le praterie di fanerogame marine (tra cui Posidonia o.), le rupi costiere, i sistemi dunali.

Questi habitat forniscono importantissimi servizi all'uomo, come cibo, depurazione, difesa da mareggiate e inondazioni, controllo dell'erosione costiera, svago e ricreazione. Di fatto, il valore economico dei servizi forniti da praterie di fanerogame marine, dune, spiagge e lagune costiere è stimato dieci volte superiore a quello di qualsiasi sistema terrestre, con valori che raggiungono i 350.000 euro per ettaro all'anno.

La perdita di questi sistemi naturali ha causato danni economici rilevanti per molti Paesi europei, inclusa l'Italia.

Basti pensare al problema dell'erosione costiera (mediamente 8 milioni di euro di interventi di difesa per il biennio 2018-2019 per le sole coste della regione Toscana), facilitata dalla perdita di habitat marini che forniscono alle coste delle difese naturali.

In Europa restano pochi esempi di habitat nativi costieri ancora intatti, e questi sono seriamente minacciati dai cambiamenti globali in corso. È auspicabile la loro immediata protezione all'interno della rete Natura 2000, un complesso di siti protetti nel territorio dell'Unione Europea, la cui funzione è garantire la sopravvivenza a lungo termine della biodiversità del continente europeo.

Per prevenire l'ulteriore perdita di habitat marini-costieri saranno necessari seri investimenti di ripristino, e la cooperazione attiva tra agenzie governative, organizzazioni non governative e università/ centri di ricerca (Fig. 1 e Fig. 2).

AMBIENTE COSTIERO IN ITALIA

Le spiagge e le dune potrebbero sembrare ambienti privi di valore economico: infatti sono troppo instabili e soggette ad erosione e mareggiate, e pertanto in generale non sono edificabili; attività agricole (essenzialmente orticultura) sono possibili soltanto nella fascia più interna e nelle lacune interdunali, cioè al di fuori della duna vera e propria.

Ciò nonostante, le spiagge di tutto il Mediterraneo, e particolarmente quelle italiane, sono soggette da alcuni decenni ad un impatto generalizzato, che minaccia di produrre alterazioni irreversibili.

Gli impatti sulle spiagge derivano in generale da un'errata politica di gestione del territorio, e vengono aggravati dalle conseguenze, dirette e indirette, dello sviluppo del turismo di massa.

L'impatto si rende evidente soprattutto attraverso danni diretti o indotti all'ambiente fisico, come sbancamenti e processi di erosione ben visibili su molte spiagge, e attraverso la semplificazione delle comunità biotiche, spesso banalizzate da elementi estranei infestanti "eurieci" (orga-

Figura 4. Mappa dei paesaggi sensibili costieri più a rischio (da Italia Nostra, 2010).

nismi che presentano un notevole grado di adattabilità), tolleranti e ad ampia distribuzione geografica.

Gli ecosistemi costieri sabbiosi, per loro stessa natura e collocazione topografica, debbono confrontarsi con situazioni difficili e mutevoli, nel breve e nel lungo termine.

Le loro capacità di "autoriparazione" e di resilienza, dal punto di vista idrogeologico, geomorfologico, floristico e faunistico, sono ovviamente molto elevate.

Queste considerazioni ci potrebbero far credere che gli ambienti costieri sabbiosi, anche dove disturbati pesantemente dalle attività antropiche, o perfino dove totalmente distrutti, siano in grado prima o poi di ricostituire spontaneamente degli ecosistemi litoranei di buona qualità ambientale.

Sebbene queste ipotesi abbiano un certo fondamento (ma con prospettive di decine o centinaia di anni), sono però difficilmente compatibili con scenari a breve termine, che ci coinvolgono più direttamente.

Ci occuperemo più avanti delle possibili strategie di conservazione, gestione e recupero ambientale che interessano gli ambienti litoranei sabbiosi italiani.

PERDITA DI BIODIVERSITÀ IN ITALIA

Per le specie vegetali di interesse comunitario presenti sul territorio nazionale, è importante intanto segnalare come tra le piante vascolari troviamo un elevatissimo tasso di endemismo (su 95 specie, 52 sono endemiche italiane) rendendo ancora più importante il ruolo del nostro Paese nella loro conservazione, come anche evidenziato dalla Lista Rossa della Flora Italiana.

Secondo i risultati dell'analisi effettuata su 197 *Policy Species* italiane circa il 45% delle specie esaminate mostrano una situazione in generale critica (alcune specie sono già estinte o prossime all'estinzione) malgrado la loro protezione a livello internazionale e nazionale.

Le regioni che hanno il più alto numero di entità autoctone sono il Piemonte (3.464), la Toscana (3.370), la Lombardia (3.272), e l'Abruzzo (3.190).

La biodiversità vegetale del Mediterraneo è fortemente minacciata dai cambiamenti causati dalle attuali dinamiche socio-economiche e di utilizzo del suolo: ad esempio, da una parte il crescente consumo di suolo sta portando ad una riduzione di habitat naturali, dall'altra lo spopolamento dei territori montani negli ultimi cinquanta anni ha determinato un espansione dei territori forestali, anche a scapito di habitat aperti, legati alle pratiche tradizionali di utilizzo del suolo da parte dell'uomo.

Senza contare l'effetto dei cambiamenti climatici che potrebbe portare - nel lungo periodo - a migrazioni di specie e habitat, nonché a estinzioni almeno a livello locale (Fig. 2).

Nell'intero bacino del Mediterraneo, che è considerato uno delle aree mondiali a maggiore biodiversità, solo la Turchia ospita un numero di specie più elevato.

La presenza di 568 piante non è stata confermata in tempi recenti per il territorio nazionale; tra queste 26 sono probabilmente estinte (di cui 13 sono endemiche italiane) (Fig. 5 e Fig. 6).

EROSIONE COSTIERA

Quasi il 50% delle nostre coste sabbiose è attualmente soggetto a erosione, un fenomeno che negli ultimi 50 anni ha fatto scomparire 40 milioni di metri quadrati di spiagge. Sono stati persi 23 metri di profondità di arenile su 1750

FIGURA 5. Ambiente costiero integro (da F. Boccalaro, 2006).

FIGURA 6. Ambiente costiero degradato (da G. Bovina, 2007).

chilometri di litorale. A lanciare l'allarme su questa emergenza ambientale è Legambiente, che presenta uno studio sullo stato di erosione delle coste in Italia e inaugura il portale dell'Osservatorio Paesaggi Costieri Italiani, piattaforma dove poter consultare analisi e risultati di ricerche scientifiche.

Legambiente ha elaborato un quadro dell'evoluzione dell'erosione delle nostre coste tra il 1970 e il 2020 (partendo dagli ultimi dati pubblicati dal Ministero dell'Ambiente in collaborazione con Ispra e con le 15 Regioni marittime) e un'analisi delle cause principali, da attribuire ai cambiamenti molto rilevanti che hanno coinvolto negli ultimi decenni le coste.

A partire dal consumo di suolo (soprattutto in Sardegna, Sicilia, Puglia e Calabria), con la costruzione di edifici e di nuove opere infrastrutturali portuali o di opere rigide a difesa dei litorali, fino ad arrivare ai fenomeni legati ai cambiamenti climatici in atto, che rischiano di peggiorare il fenomeno.

Tornando ai dati, elaborati dal geologo marino Diego Paltrinieri per Legambiente, su circa 8.000 km di litorale, le coste basse sabbiose (che sono quelle sostanzialmente erodibili) coprono 3.770 km, di cui 1.750 km sono attualmente in erosione: per un tasso di erosione del 46,4%. Negli ultimi 50 anni, i litorali in erosione sono triplicati. I dati evidenziano inoltre un profondo dislivello tra Nord e Sud del paese, con picchi fino al 60% nelle regioni di Sicilia e Calabria. Le opere marittime connesse al sistema portuale nazionale si sviluppano per una lunghezza complessiva di circa 2.250 km (dati Ispra 2010).

Questa profonda artificializzazione del litorale ha innescato fenomeni di erosione dovuti in sostanza alla alterazione della naturale dinamica litoranea.

Il litorale toscano continentale è esteso circa 470 km e circa il 50% delle sue spiagge (estese 190 km) è soggetto ad erosione; ciononostante solo il 17% può considerarsi a rischio molto elevato e la limitazione del livello di rischio è dovuta al modesto sviluppo urbano e industriale della fascia costiera.

L'arretramento della linea di riva è più rapido (anche 10 o 20 m/a) alle ali deltizie dei fiumi Arno e Ombrone, ove l'erosione raggiunge la massima efficacia, anche per la quasi totale assenza di opere di difesa. In queste zone il rischio riguarda essenzialmente ambienti igrofili e di dune costiere, unici in Italia. Altri tratti a rischio molto elevato sono in corrispondenza delle foci di fiumi minori, a riprova che la causa principale dell'erosione risiede nell'impoverimento degli apporti fluviali e quindi nella gestione dei bacini imbriferi. In settori di estensione limitata il rischio elevato è dovuto alla presenza di zone archeologiche e biotopi (Tab. 1 e Fig. 5).

Tabella 1. Stato dei litorali italiani (da CNR, 2006)

Regione	Lunghezza totale coste (km)	Coste alte e aree portuali (km)	Coste basse (km)	Tratti in erosione (km)	Spiagge in erosione (%)
Liguria	350	256	94	31	33,0
Toscana	442	243	199	77	38,7
Lazio	290	74	216	117	54,2
Campania	480	256	224	95	42,4
Calabria	736	44	692	300	43,4
Sicilia	1.623	506	1.117	438	39,2
Sardegna	1.897	1.438	459	165	35,9
Basilicata	68	32	36	28	77,8
Puglia	865	563	302	195	64,6
Molise	36	14	22	20	90,9
Abruzzo	125	26	99	60	60,5
Marche	172	28	144	78	54,2
Emilia Romagna	130	o	130	32	24,6
Veneto	140	o	140	25	17,9
Friuli Venezia Giulia	111	35	76	10	13,2
Italia	**7.465**	**3.515**	**3.950**	**1.671**	**42,3**

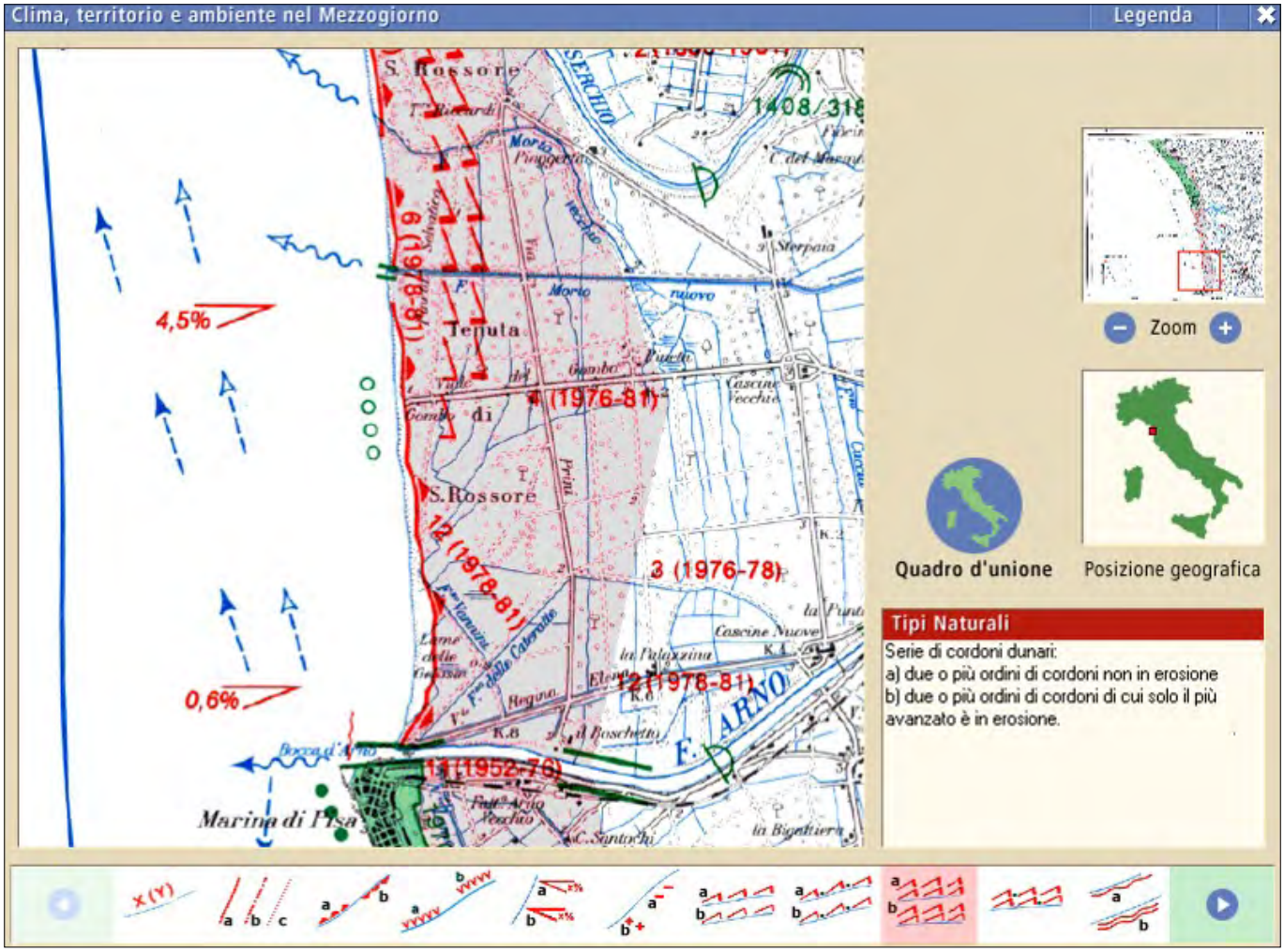


Figura 5. Dinamiche foce d'Arno (da CNR, 1999).

EROSIONE DEI LITORALI TOSCANI – CRITICITÀ E NECESSITÀ

Dal 2016 la Regione ha aggiornato il suo Piano Coste per il periodo 2016-2033 per un importo di almeno 115 milioni di euro. La Regione sicuramente interviene e in questa fase si stanno progettando interventi per almeno 22 milioni di euro che interessano una ventina di località, tra cui quelle con maggiori criticità quali Marina di Massa, Marina di Pisa, S. Vincenzo, Follonica, Cecina, Castiglion della Pescaia e Orbetello con la riviera della Costa d'Argento.

Si vuole rimarcare che diversi di questi interventi sono reiterazioni di interventi già realizzati e alcuni riguardano sempre le stesse zone già in crisi negli anni 70 e legati in sostanza agli "effetti collaterali" delle strutture portuali e delle opere rigide poste in opera per curare questi effetti collaterali. Molti dei problemi attuali sono il risultato di interventi di difesa effettuati nei decenni passati per proteggere alcuni limitati tratti di litorale.

Un dato di fatto è evidente: il sistema costiero non è in equilibrio da tempo, e sarebbe quindi fondamentale intervenire sulle cause scatenanti di questa erosione, la cui esca-

Figura 6. Spiaggia di Follonica completamente urbanizzata (da CoReMaspiagge, 2019).

Figura 7. La costa di Marina di Pisa con circa 2,3 km di difese rigide per ogni km di costa (da CoReMaspiagge, 2019).

lation è legata soprattutto alla presenza delle opere rigide realizzate ed alla conseguente alterazione della dinamica della corrente litoranea di fondo. Anche la durata troppo limitata dei ripascimenti deve far riflettere sulla strategia di fondo da adottare.

Gli interventi previsti dal nuovo Piano Coste e collegati al Piano Strategico di Sviluppo della Costa Toscana (2018), continuano però a seguire gli indirizzi operativi e le norme tecniche tradizionali, compreso il recente progetto "Ripascimento e riequilibrio dell'arenile di Castiglione della Pescaia", scaturito dal "Documento operativo per il recupero ed il riequilibrio della fascia costiera", nell'annualità 2016 e 2017, previsto dall'art. 18 della L.R. 80/15.

In questo progetto che interessa 7 km di litorale a nord dell'abitato di Castiglione sono previsti infatti 17 pennelli e 4 barriere in scogli con diversi ripascimenti e 5 isole di sabbia sommerse.

Bisogna prendere atto che troppo spesso gli interventi di protezione dei litorali sin qui realizzati, hanno mostrato risultati ben al di sotto delle attese o hanno addirittura fallito l'obiettivo, con enorme spreco della risorsa pubblica e con impatti ambientali e paesaggistici devastanti.

Occorrerebbe riflettere seriamente su nuovi interventi per semplificare e non complicare ulteriormente il sistema naturale costiero, attraverso un monitoraggio frequente della morfologia costiera allo scopo di analizzare in dettaglio il trasporto litoraneo delle sabbie, con l'obiettivo di mantenere il più possibile una struttura di difesa naturale, rappresentata in primis dalla spiaggia emersa/sommersa e dalla sua capacità resiliente ed evitando irrigidimenti della costa che non sono in fase con la sua naturale dinamicità, come oramai ampiamente dimostrato dalle cronache degli ultimi decenni.

RIVEGETAZIONE DELLE DUNE

La formazione delle dune è direttamente collegata anche alla presenza della vegetazione, in particolare di quella pioniera (*Ammophila*), che favorisce la formazione di depositi embrionali, a distanze anche molto ridotte rispetto alla linea di riva.

La riforestazione delle dune non è però cosa semplice, dato che il substrato è in continua evoluzione e le radice delle nuove piantine vengono continuamente scoperte dal vento; essa viene quasi sempre accompagnata da interventi di Ingegneria Naturalistica, eventualmente provvisori, idonei a ridurre la mobilità dei sedimenti, oltre che a limitare l'accesso (Fig. 13).

La specie più frequentemente utilizzata per favorire la formazione di nuove dune o la stabilizzazione di quelle soggette a deflazione accelerata è l'*Ammophila litoralis*.

Le attenzioni agli aspetti ecologici delle dune hanno lo scopo di:

- mantenere pingue la falda di acqua dolce sottostante le dune, evitando il prelievo da pozzi superficiali, e facilitando la percolazione delle acque piovane (non paiono opportune le usuali fognature per acque bianche, che drenando e allontanando rapidamente le acque ne impediscono la percolazione);
- conservare la struttura di barriera naturale, anche e soprattutto nelle sue parti meno appariscenti ma più esposte che fronteggiano il mare, come la zona erbacea che fissa le sabbie (vegetazione colonizzatrice, caratterizzata in genere dalla presenza di *Ammophila arenaria*) e quella arbustiva retrostante (caratterizzata in genere dalla presenza di ginepro e lentisco, vegetazione schermante).

A costituire una prima barriera contro i venti marini è opportuno far precedere le fasce di vegetazione arborea da una prima linea di vegetazione più bassa, arbustiva, molto resistente ai venti carichi di salsedine e di sabbia; pertanto è opportuno conservare la vegetazione spontanea e, dove questa è stata eliminata, riprodurre artificialmente quella particolare forma che si trova in natura, ossia il "cuneo", per cui i venti marini, incontrata la prima fascia arbustiva, vengono sollevati in modo da sfiorare e non investire direttamente le chiome delle compagini arboree retrostanti.

Adatte a questa funzione sono le specie della bassa macchia mediterranea, quali Ginepro coccolone e fenicio, Mirto, Lentisco, Tamerici, Ginestra odorosa. Anche l'Oleandro resiste bene in queste condizioni difficili.

Gli ambienti dunali mutano le loro condizioni microclimatiche dal mare verso l'interno, ne consegue una sequenza di specie, organizzate in associazioni vegetali, adattate a vivere alle varie condizioni.

La salinità, il vento, la motilità del substrato sono massime sulla spiaggia e sulla prima duna (ambiente obiettivo del progetto), e vanno attenuandosi nell'interno. Ne consegue una vegetazione organizzata su più cinture parallele alla battigia: le prime sono quelle relative alle associazioni di psammofite tipiche della prima duna o duna mobile o duna bianca, poi si passa alla gariga discontinua sulla sommità della seconda duna o duna grigia, quindi alla macchia vera e propria.

La scelta delle specie di psammofite rappresenta la fase iniziale del progetto. I criteri della scelta sono:

- la rappresentatività nell'ambito delle varie associazioni vegetali presenti sul territorio italiano;
- la capacità strutturante e contenitiva nell'ambito del processo di costruzione della duna;
- la rarità e il rischio di scomparsa.

Per evitare, durante lo svolgimento delle attività, qualsiasi forma di depauperamento del patrimonio vegetale naturale attraverso eccessivi prelievi sul campo, si effettuano alcune campagne di prelievo volte a costruire un vivaio di piante madri, su cui basare gran parte delle attività.

Ma dove si trovano sabbie nude, mobili sotto la spinta del vento, è opportuno far precedere il rimboschimento da specie consolidatrici, adatte a questo particolare tipo di suolo sabbioso e salso.

Di solito l'imbrigliamento delle sabbie si effettua mediante reticolo di schermature, e nei riquadri viene eseguita la semina, o la piantagione, di specie erbacee (*Ammophila arenaria*, *Agropyrum junceum*, *Cakile marittima*, *Eryngium maritimum*, ecc.) o arbustive (*Tamarix* sp., *Juniperus macrocarpa*).

In ogni caso tutte queste piante, dapprima arbustive poi arboree, delle fasce litoranee esercitano un'azione favore-

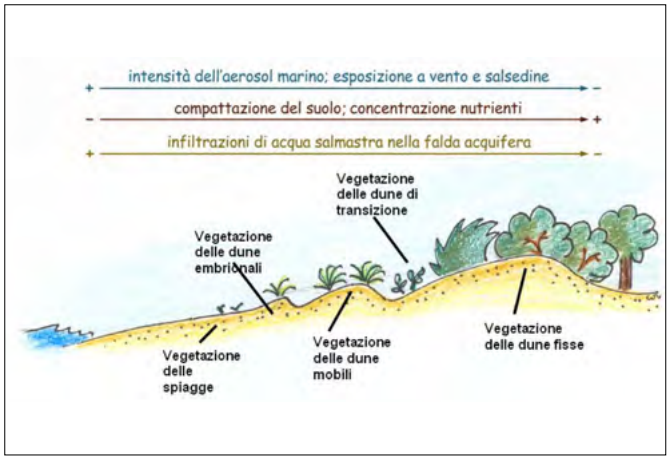


Figura 8. Interazione tra fattori fisici e vegetazione dunale.

Figura 9. Successione vegetazionale dunale alla foce del Coghinas (da F. Boccalaro, 2006).

Figura 10. Finalità dell'Ingegneria Naturalistica (da AIPIN, 2020).

Figura 11. Piantagione di Ammophila arenaria sulle dune di S. Rossore (da F. Boccalaro, 2008).

vole sulla vegetazione che le segue verso l'interno, che è quella, a volte d'importanza vitale, di ripararle dai venti marini carichi di salsedine, di sabbia e di inquinanti, i quali determinano forte erosione, esplicano azione disseccante sulla vegetazione e sul terreno e provocano deperimento della vegetazione.

PROGETTAZIONE DI INTERVENTI COSTIERI - INTERVENTI SU DUNE COSTIERE

Le tecniche di intervento utilizzate nel mondo per stabilizzare o ricostituire le dune sono estremamente diversificate, anche se si stanno evolvendo tutte nella direzione dell'Ingegneria Naturalistica, come avviene ad esempio con la creazione di barriere frangivento in materiali naturali che simulano l'effetto della vegetazione (Fig. 12). Si

FIGURA 12. Stabilizzazione di dune costiere con griglie di siepi morte.

FIGURA 13. Schermature in paleria di castagno a Ainsdale (Olanda) (da U. Macchia, 1993) (da Alan Brooks & Elizabeth Agate, 2004).

trovano comunque anche difese costruite con staccionate in legno, barriere di plastica e reti in geotessuto (Fig. 13).

L'accesso alla spiaggia viene spesso realizzato con percorsi sinuosi, così che il vento non possa incanalarvisi, e senza operare tagli artificiali; inoltre, si copre il suolo con passerelle in legno (Fig. 14) o con detriti vegetali di varia natura, in modo da impedire la deflazione laddove il calpestio non consente lo sviluppo della vegetazione.

RINATURALIZZAZIONE DI UN SISTEMA SPIAGGIA-DUNA

L'ideale schema operativo per lavori di ripristino ambientale, che coinvolgano sistemi dunali erosi, distrutti o con ecosistemi totalmente banalizzati, si può così sintetizzare.

1. Realizzazione di uno studio di compatibilità ambientale ed economica dell'intero progetto, con raccolta del maggior numero di informazioni possibili sullo status naturale del sito sotto il profilo geomorfologico (foto, disegni, mappe, ricordi dei locali, ecc.) e sulle caratteristiche delle relative sabbie.

Raccolta di tutti i dati possibili sulla vegetazione potenziale naturale dell'area e sulla fauna invertebrata associata.

2. Calcolo della cubatura di sabbia necessaria per il ripascimento dell'area in oggetto fino al raggiungimento di una fisionomia dunale assimilabile a quella naturale accertata o stimata, e progettazione delle strutture e del profilo finali attesi dell'intero sistema a regime.

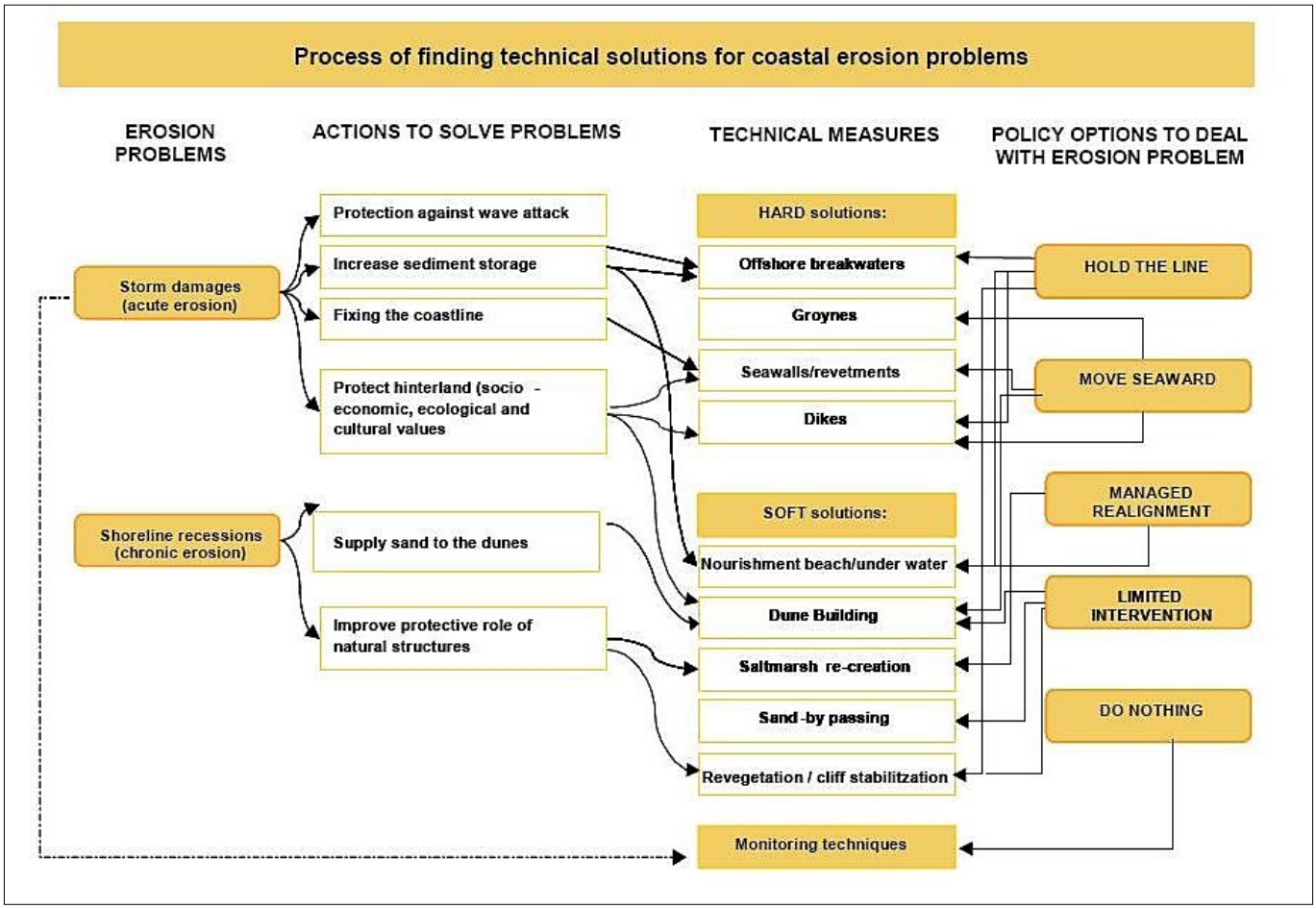


FIGURA 14. Soluzioni per problemi di erosione costiera (CIRIA, 2014).

Figura 15. Morfobatimetrica dei fondali della cava marina di Montalto di Castro con tecnologia *multibeam* (da ICRAM, 2003).

Sotto la supervisione di sedimentologi e di biologi marini, individuazione di un'adatta area ove effettuare, senza significativi danni e ripercussioni sulla morfologia costiera e sulle comunità bentoniche, il prelievo della necessaria cubatura di sabbia; di norma è più opportuno scegliere sabbie di origine marina, individuando banchi a profondità ottimali intorno ai 10-20 metri, possibilmente nella stessa zona del sito di ripascimento, sia per ragioni di economicità di trasporto, che per affinità sedimentologiche del substrato.

3. Identificazione delle specie vegetali adatte alla ricolonizzazione artificiale e controllata delle dune embrionali e

Tavola 1. Specie adatte per la stabilizzazione dunale

Specie	Nome comune	Famiglia	Tecnica di riproduzione testata	Tecnica ritenuta commercialmente efficace
Agropyron junceum	Gramigna delle spiagge	Graminaceae	Separazione Seme	* *
Ammophila littoralis	Sparto pungente	Graminaceae	Separazione Seme	* *
Anthemis marittima	Camomilla marina	Compositae	Taleaggio Separazione Seme	*
Cakile marittima	Ravastrello marittimo	Crucuferae	Seme	*
Calystegia soldanella	Vilucchio marittimo	Campanulaceae	Separazione Seme	*
Carpobrotus acinaciformis	Fico degli Ottentotti	Aizoaceae	Taleaggio Separazione	*
Crucianella maritima	Crucianella marittima	Rubiaceae	Taleaggio Separazione	*
Cyperus kalli	Zigolo delle spiagge	Cyperaceae	Separazione Seme	*
Dorycnium hirsutum	Trifoglino irsuto	Leguminosae	Taleaggio Seme	*
Echinophora spinosa	Carota di mare	Umbellifarae	Separazione Seme	
Eryngium maritimum	Calcatreppola marina	Umbellifarae	Separazione Seme	*
Glaucium flavum	Papavero cornuto	Papaveraceae	Seme	*
Juncus acutus	Giungo pungente	Juncaceae	Separazione Seme	*
Lagurus ovatus	Piumino	Graminaceae	Seme	*
Matthiola sinuata	Violaciocca sinuate	Crucuferae	Taleaggio Separazione Seme	*
Medicago marina	Erba medica marina	Leguminosae	Taleaggio Separazione Seme	* *
Ononis variegata	Ononide screziata	Leguminosae	Seme	*
Otanthus maritimus	Santolina delle spiagge	Compositae	Taleaggio Separazione Seme	*
Pancratium maritimum	Giglio di mare	Amaryllidaceae	Seme	*
Plantago coronopus	Piantaggine barbatella	Plantaginaceae	Separazione Seme	*
Sporobolus pungens	Gramigna delle spiagge	Graminaceae	Separazione Seme	* *

di quelle mobili, e calcolo per ciascuna specie della quantità di plantule necessarie per le operazioni di reimpianto; la scelta di piante autoctone è opportuna soprattutto nella stabilizzazione di dune mobili, e inoltre favorisce lo sviluppo di comunità vegetali più ricche e diversificate.

La specie-guida del processo di fitostabilizzazione delle dune riqualificate è tipicamente rappresentata nel Mediterraneo dallo Sparto pungente (*Ammophila littoralis*), eventualmente accompagnata in una seconda fase dalle lo-

prelievi di specie vegetali da reimpiantare, utilizzando la tecnica del diradamento locale.

Di norma per ciascuna specie interessata sono consigliabili prelievi non superiori al 5-10 % del totale di individui vegetali presenti, compatibili con una naturale rapida resilienza della comunità vegetale di origine.

L'eventuale disponibilità di vivai locali che forniscano plantule e semi delle specie vegetali interessate può spesso essere una valida alternativa o un utile complemento.

Figura 16. Vivaio al Parco dei Monti Aurunci (da F. Boccalaro, 2006).

calmente più adatte entità psammofile erbacee o arbustive di dune embrionali, duna e retroduna (*Lotus* spp., *Cakile maritima*, *Juniperus* spp., *Rosmarinus officinalis*, *Tamarix* spp., *Quercus ilex*, ecc.).

Il contingente delle specie prescelte può comprendere: *Agropyron junceum, Ammophila littoralis, Anthemis marittima, Cakile marittima, Calystegia soldanella, Crucianella maritima, Cyperus kalli, Dorycnium hirsutum, Echinophora spinosa, Eryngium maritimum, Glaucium flavum, Juncus acutus, Lagurus ovatus, Matthiola sinuata, Medicago marina, Ononis variegata, Otanthus maritimus, Pancratium maritimum, Phragmites australis, Plantago coronopus, Sporobolus pungens.*

Sono da sperimentare i principali metodi produttivi vivaistici: il taleaggio, la produzione da seme e la separazione dei polloni, e le migliori risposte in termini di produzione efficiente sono esposti nella Tavola 1.

4. Individuazione, in aree limitrofe di buona qualità ambientale, di ecosistemi dunali nei quali, in accordo con le competenti autorità di controllo, e sentito il parere di esperti botanici e zoologi, si possano effettuare i necessari

5. Prelievo con draghe montate su chiatte da trasporto delle previste quantità di sabbia, e sua veloce rideposizione nel nuovo sito, a livello della spiaggia emersa, lasciando possibilmente che almeno una parte dell'attività di modellamento dei cumuli sia affidata per qualche tempo successivo al moto ondoso, alle maree e ai venti dominanti, piuttosto che ai soli mezzi meccanici di movimentazione.

Figura 17. Ripascimento sulla costa romagnola (Regione Emilia Romagna, 2014).

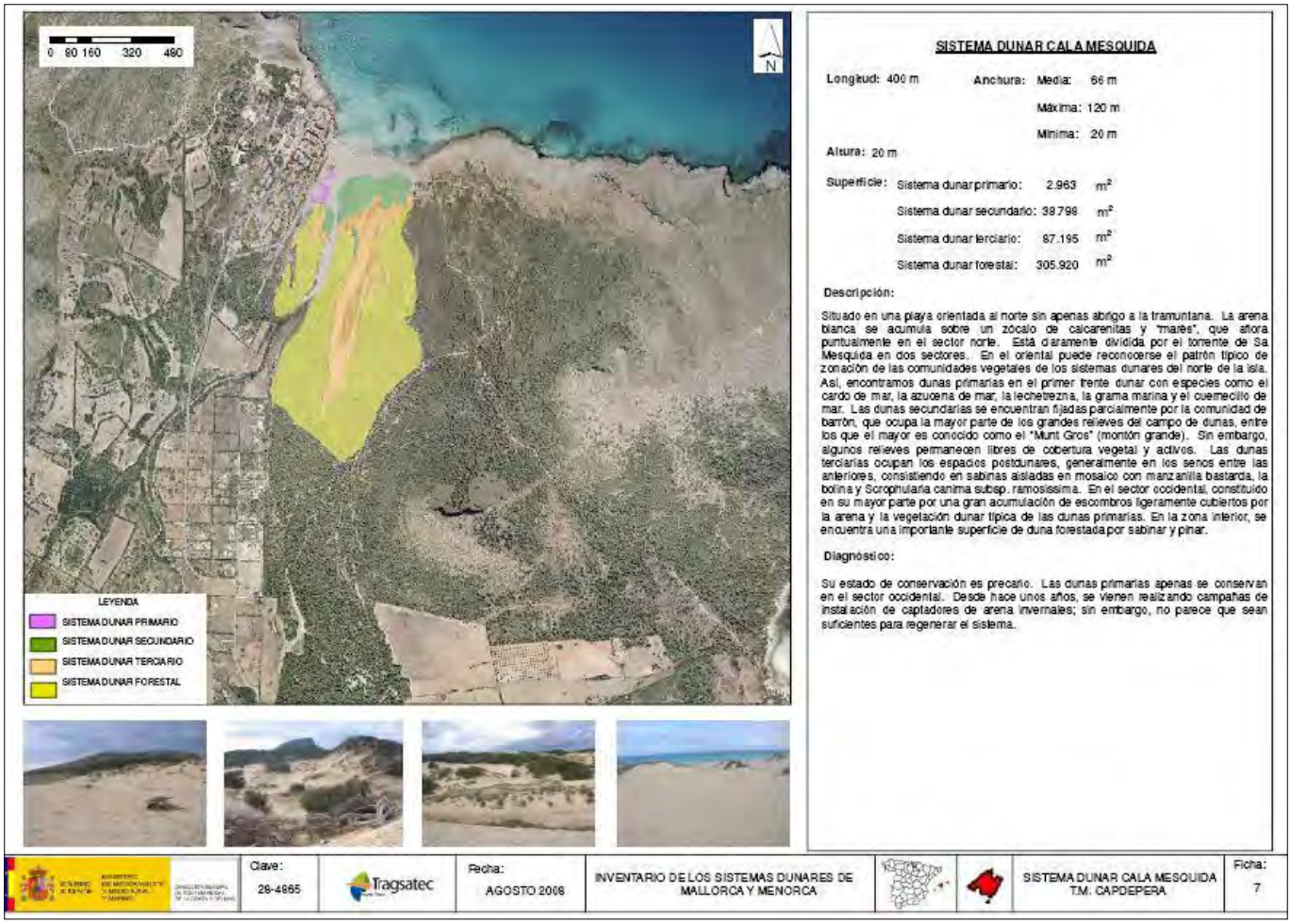


Figura 18. Intervento di riqualificazione dunale a Cala (da Scottish Natural Heritage, 2004) Mesquida - Maiorca, ES (da F. Boccalaro, 2010).

6. Predisposizione delle zone di reimpianto delle specie vegetali, utilizzando rami e ramaglie (o eventualmente reti artificiali) di norma disposti a disegnare quadrati e linee parallele, parzialmente infossati sui cumuli rimodellati, con basse recinzioni lignee frangivento, al fine di agevolare e proteggere la delicata fase iniziale di attecchimento e di ripresa vegetativa delle specie vegetali introdotte.

7. Raccolta delle essenze vegetali prescelte nel sito di prelievo e rapido reimpianto delle stesse nel sito di destinazione. La messa a dimora può prevedere in una prima fase una densità media ottimale di Ammophila intorno alle 5-6 piante per metro quadrato, organizzando in modo casuale sub-moduli di una dozzina di metri quadri con densità di una quindicina di piante per metro quadro, alternati ad ampi spazi lasciati liberi o con densità inferiore.

Questa disposizione permette di simulare la naturale disposizione a gruppi di addensamento, tipica delle Ammophila, che consente un più facile inserimento spontaneo o indotto di altre specie pioniere. Anche la pratica di cospargere le dune con i resti di Posidonia ed altre erbe marine spiaggiate ha dato buoni risultati, trattandosi di materiali naturali largamente disponibili in loco e che rapidamente scompaiono senza lasciare tracce o richiedere lavori di risistemazione.

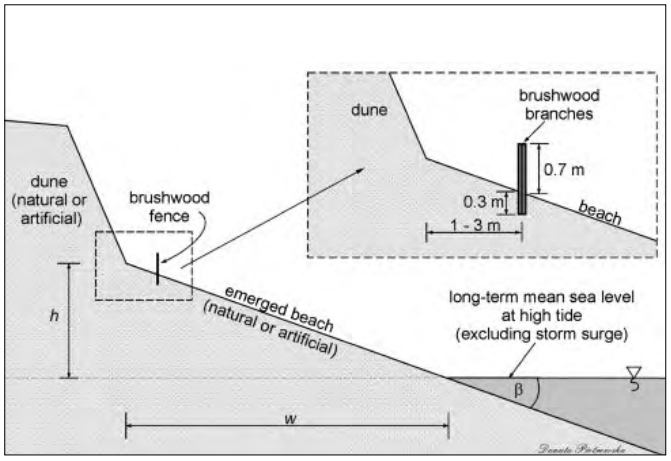


Figura 19. Intervento tipo di schermatura dunale.

Figura 20. Piantagione di Ammophila e passerella sopraelevata in legname sulle dune di Cala Mesquida (Maiorca, ES) (da F. Boccalaro, 2010).

8. Integrazione delle piantumazioni delle ammofile con quella delle altre specie vegetali previste, e monitoraggio periodico dell'intero sistema per due-tre anni, al fine di controllare l'attecchimento delle piante messe a dimora (grado di vitalità dei trapianti), e la resilienza dell'ecosistema (grado di naturalità dei trapianti), ovvero la capacità di altre piante pioniere di attecchire spontaneamente sulle dune ricostruite artificialmente.

Figura 21. Monitoraggio costiero sulla costa inglese (da DEFRA, 2010).

9. Monitoraggio delle comunità di invertebrati psammofili insediatesi naturalmente, almeno per un triennio. Una particolare attenzione è opportuno sia data alle coleotterocenosi, per le loro marcate capacità di colonizzazione e dispersione, e la loro elevata rappresentatività nel fornire indicazioni sulla qualità biologica complessiva degli ecosistemi terrestri.

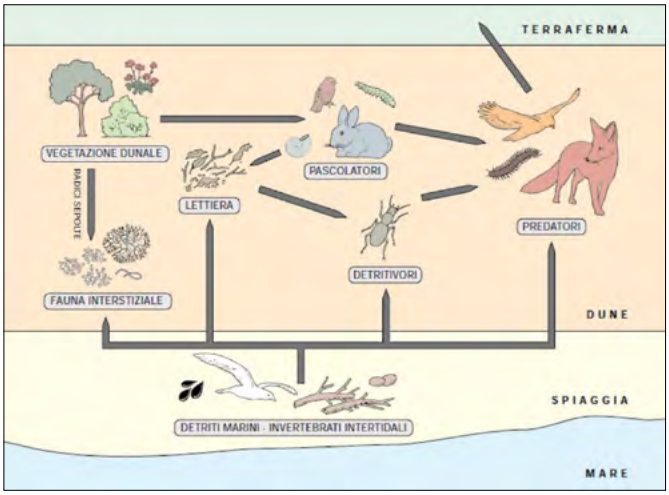


Figura 22. Reti trofiche (da M.S.N, 2010).

RINATURALIZZAZIONE DEI FONDALI MARINI

L'ideale schema operativo per lavori di ripristino ambientale, che coinvolgano fondali marini erosi, distrutti o con ecosistemi totalmente banalizzati, si può così sintetizzare.

1. Trapianto di Fanerogame bentoniche costiere. I progetti di rivegetazione dei fondali marini di spiagge sommerse devono essere sempre preceduti da approfonditi studi sulle caratteristiche abiotiche e edafiche nel sito di trapianto ed integrati da tecniche di ingegneria naturalistica quali materassi, paletti tutori, reti metalliche, rulli frangiflutti ecc., intorno alla zona di intervento per proteggere l'erbario, in fase di accrescimento, dal moto ondoso e dalle correnti, assicurando così l'evoluzione positiva del sistema.

Conviene evitare l'uso anarchico e abusivo delle tecniche di ripristino delle praterie esistenti: reimpianto di Posidonia oceanica come alibi per distruzioni dovute a nuovi lavori costieri, immersione di blocchi ribattezzati "barriere artificiali", messi in posto su siti non appropriati, ecc. Alcuni principi possono costituire la base di un codice di buona condotta (Tab. 2).

Tabella 2. Lista di controllo per la progettazione di forestazione dei fondali marini e lagunari (da F.Boccalaro, 2004)

	Descrizione
1.	Studio dei rilievi pedologici relativi al fondale (caratteristiche fisiche, chimiche, biologiche).
2.	Studio dei rilievi geologici ed idrologici.
3.	Studio dei dati fisici (luce, temperatura, velocità della corrente, maree), chimici (inquinamento) e biologici del corpo idrico.
4.	Studio dei rilievi vegetazionali del fondale o cartografici esistenti o loro esecuzione nell'ambito del futuro tratto da sistemare.
5.	Studio dei lavori preliminari relativi all'ecologia dei corpi idrici.
6.	Studio dei rilievi geomorfologici (erosione, deposito sedimenti, ecc.).

Nota - La profondità e la salinità dell'acqua, il suo idrodinamismo, nonché il tipo di sedimento del fondale, condiziona la scelta della specie da impiantare

- *Posidonia Oceanica* predilige fondali oltre i due metri di profondità, salinità alta, corrente accentuata e sedimento a granulometria grossolana.
- *Cymodocea nodosa* predilige fondali oltre il metro di profondità, salinità media, corrente accentuata e sedimento a granulometria grossolana.
- *Zostera marina* predilige fondali oltre il metro di profondità, salinità media, corrente moderata e sedimento fine.
- *Zostera noltii* predilige fondali inferiori al metro di profondità (*barene*, *velme*), salinità media, corrente moderata e sedimento fine. È una specie con cicli di crescita-deperimento imprevedibili
- *Ruppia maritima* predilige fondali inferiori al metro di profondità (*ghebi*, *chiari*), salinità bassa, corrente moderata e sedimento sabbioso-limoso.

È da evitare l'impianto di un vivaio. È preferibile effettuare un trapianto in zolle (20x30 cm) a *nuclei* di *innesco* da praterie di rifornimento di buona qualità in tempi brevi (*max* 12 h) e durante la primavera, eventualmente con l'ausilio di reti metalliche o sintetiche a maglia larga (5-10 cm) ancorate al suolo.

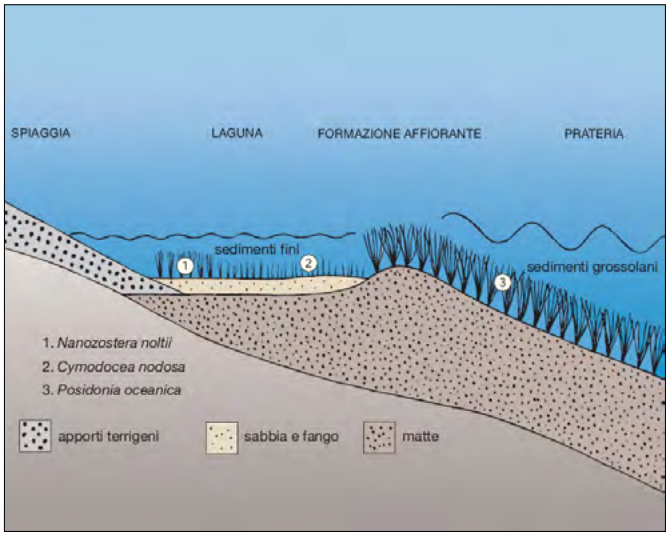


Figura 23. Evoluzione della prateria e formazione della "*récife barriere*".

Figura 24. Materassi per impianti di *Posidonia o*. (da: Boudouresque e Meinesz, 1982, modificato) (da F. Cinelli, 2009).

2. Messa a dimora di barriere sommerse antistrascico. Le scogliere di protezione devono essere un ostacolo deterrente per interdire i fondali ai pescherecci a traino: essi rischiano di danneggiare le loro attrezzature da pesca.

I moduli di barriere anti-pesca a strascico devono essere abbastanza pesanti (almeno 8t) per costituire una efficace barriera fisica e non possono essere trascinati da una rete da traino o essere danneggiati da pannelli di reti da traino.

I moduli devono avere una sufficiente superficie di appoggio rispetto ai sedimenti, non dovendo affondare. Gli elementi "*sea-roacks*", a tronco di piramide, sono particolarmente efficaci su fondi fangosi, e inoltre sono poco rilevabili dalle sonde dei pescherecci .

È anche importante che la forma dei moduli anti-reti da traino non rischi di danneggiare le reti dei pescatori professionisti o della piccola pesca artigianale), che devono essere in grado di lavorare nelle aree trattate e che devono beneficiare delle barriere dissuasive.

I moduli anti-strascico devono essere sommersi uno per uno, in modo da essere distanziati tra di loro (da 50 a 200 m).

L'insieme delle barriere anti-pesca a strascico deve occupare il massimo spazio per essere davvero dissuasivo per il traino.

3. Posa di ormeggi sostenibili. Il processo di degrado della Posidonia viene innescato non solo dall'azione meccanica dell'ancoraggio, ma anche dall'azione di soffocamento prodotto dalla sospensione derivante dallo sgretolamento della matte.

Le soluzioni sono elencate di seguito.

- Evitare gli ancoraggi per consentire che dalle aree in buona salute possa propagarsi la ricolonizzazione naturale delle aree in cui la vegetazione è scomparsa.
- Utilizzare i campi ormeggio per evitare gli ancoraggi.
- Aiutare il processo di ricolonizzazione per mezzo di trapianti in aree selezionate.
- Effettuare un monitoraggio continuo sull'evoluzione della prateria al fine di valutare l'effetto delle azioni intraprese.

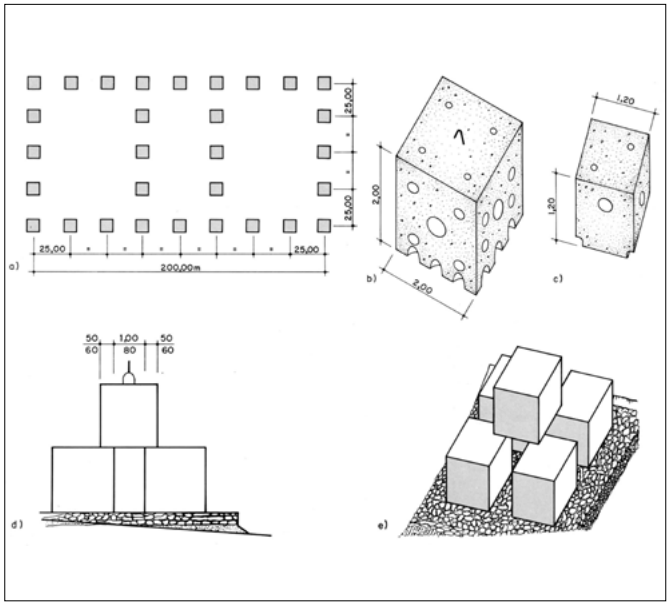


Figura 25. Disposizione dei blocchi di barriera artificiale a Loano (da G. Relini, 1991).

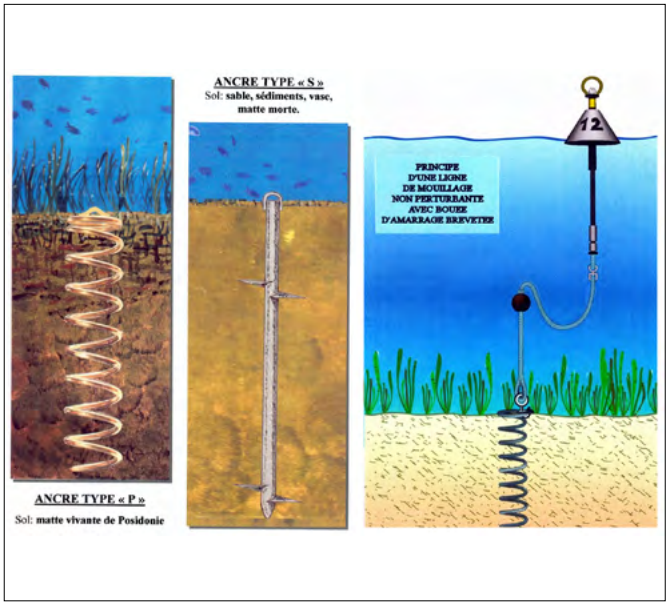


Figura 26. Tipi di ancoraggio su "*matte*" (da Robert, 2005).

Erosione e cementificazione costiera: la situazione in Italia con particolare riferimento alla Basilicata (Italia)

Coastal erosion and concretement: the situation in Italy with particular reference to Basilicata (Italy)

Marta Izzo

E-mail: izzo.marta97@gmail.com

Parole chiave: erosione costiera, cementificazione, abusivismo
Key words: coastal erosion, overbuilding, unauthorized building

Da sempre le coste hanno offerto un posto ideale per l'urbanizzazione e lo sviluppo di tutte le attività ad esse connesse. In Italia si stima che circa il 30% della popolazione sia concentrata nei centri urbani presenti lungo il litorale. L'aumento nel corso degli anni delle strutture ricettive e balneari, dei porti, dell'inquinamento delle acque e dell'utilizzo delle risorse naturali, ha peggiorato la qualità ambientale delle coste italiane danneggiando anche il settore del turismo. Ad aggravare la situazione ci pensa poi l'erosione costiera: oltre che da fattori naturali (quali venti, correnti, innalzamento del mare ecc.), questo fenomeno è provocato anche da diverse attività umane come l'intensa urbanizzazione delle coste, con la costruzione di porti e abitazioni, i lavori di manutenzione con mezzi meccanici eseguiti sulle spiagge, la rimozione dei materiali spiaggiati e gli stessi interventi di difesa.

L'ABUSIVISMO IN ITALIA

Come in molti altri paesi che affacciano sul Mediterraneo, anche in Italia l'abusivismo è un fenomeno estremamente diffuso lungo le coste. La crisi edilizia che ha colpito l'Italia negli ultimi decenni ha penalizzato molto meno la produzione illegale di quella legale e, come conseguenza, se nel 2008 il 9,3% dei nuovi edifici residenziali risultava abu-

Figura 1. Esempio di cementificazione delle aree costiere per la realizzazione di infrastrutture turistiche.

Figura 2. Effetti dell'erosione costiera in corrispondenza della foce del Basento.

sivo, nel 2014 la cifra salì al 17,6%. Tra le azioni dal basso nella lotta all'edilizia costiera illegale, particolarmente interessanti sono le iniziative di alcuni artisti, che denunciano l'illegalità del settore edile attraverso le loro opere come, ad esempio, la mostra Ecomostro tour inaugurata nel 2015 da Maria Teresa Furnari.

LUNGO LE COSTE DELLA BASILICATA

La costa adriatica presenta la morfologia e le condizioni climatiche più attrattive per l'insediamento nell'area mediterranea e per questo oggi meno del 30% del suo waterfront è libero da urbanizzazioni. Per quanto riguarda la Basilicata, uno studio di Legambiente evidenzia come il 27% delle sue coste sia stato trasformato da usi urbani e infrastrutturali. Lungo la costa Ionica, in particolare, neanche la presenza della Riserva Naturale del Metaponto e della Riserva Regionale tra Policoro e la foce del fiume Sinni, è riuscita a scongiurare la costruzione del porto e dell'insediamento turistico di Marinagri e dei tre complessi turistici immediatamente alle spalle della pineta. Per quanto concerne la costa tirrenica, invece, dall'analisi condotta si evince che nel periodo tra il 1988 e il 2011 alcuni centri, come Acquafredda e Marina di Maratea, sono cresciuti sensibilmente come densità e il porto di Maratea ha visto le trasformazioni del suo porto principale. Per ridurre l'erosione costiera sono state applicate con successo alcune tecniche, come ad esempio il ripascimento e la BMS, su piccoli tratti di costa della Basilicata; nonostante la loro efficacia però, questi metodi sono risultati purtroppo insostenibili dal punto di vista economico e gestionale.

Variazioni della linea di costa lungo la Catena Costiera calabrese negli ultimi 500 anni dai dati storico-cartografici e geomorfologici

Variations of the coastline along the Catena Costiera (Calabria) in the last 500 years from historical-cartographical and geomorphological data

Gaetano Osso
Geologo, Arpa Calabria

E-mail: gaetano.osso@gmail.com

Parole chiave: linea di costa, cartografia storica, livello marino, variazioni climatiche, attività antropiche
Key words: coastline, historical cartography, sea level, climatic variations, anthropic activities

"…. le stesse parti della Terra non sono sempre state umide o aride, ma cambiano, così come i fiumi si formano o si seccano. E cambiano anche le relazioni tra la terra e il mare, ed una località non rimane sempre terra o mare nel corso del tempo… Noi dobbiamo supporre che questi cambiamenti seguano un ordine o dei cicli" (Aristotele, Meteorologica).

INTRODUZIONE

Nei contesti geografici e geologici in cui le catene montuose sono a ridosso della costa – quale quello della penisola calabrese, stretta e protesa verso il centro del Mediterraneo – le variazioni della linea di riva, a parità di altre condizioni, possono essere immediatamente messe in relazione con la disponibilità di sedimenti provenienti dai versanti.

La sintesi di seguito riportata deriva da uno studio già pubblicato, dal titolo "*Variazioni della linea di costa lungo la labrese. Analisi della cartografia storica e dei dati geomorfologici*" (Lena, Osso e Orsino, 2021 – Mem. Descr. Carta Geol. d'It. 108) e riguarda proprio l'esempio delle modificazioni della linea di riva lungo il litorale tirrenico della Calabria centro-settentrionale (Fig.1) negli ultimi 500 anni. La ricerca ha prioritariamente esaminato le produzioni cartografiche maggiormente rappresentative della Calabria Citeriore, contestualizzandole da un punto di vista storico, della loro affidabilità in relazione al periodo di produzione nonché del grado di restituzione e attendibilità scientifica e realizzativa. Il dato areale è stato confrontato con le rappresentazioni e le monografie di città, luoghi o punti morfologici ben individuati e conosciuti lungo la costa, quando disponibili.

I dati sono stati contestualizzati in relazione alla nota fragile costituzione geo-morfologica dell'area considerata al fine di poter analizzate le possibili cause geologiche *s.l.*, valutare le implicazioni dovute alle condizioni e ai cambiamenti climatici avvenuti nel tempo, senza tralasciare gli effetti che tali cambiamenti hanno indotto sulle attività dell'uomo e come queste ultime abbiano influito sull'ambiente fisico e sulla linea di costa.

Infine lo studio ha tenuto conto anche delle altre fonti storiche disponibili, specialmente a quelle dei dissesti idrogeologici avvenuti in passato, attinenti allo scopo della ricerca.

Figura 1. La Catena Costiera della Calabria (il segmento individua l'area di studio).

ANALISI DELLA CARTOGRAFIA STORICA.

Il punto di partenza dello studio è l'analisi e la comparazione dell'evoluzione fisiografica della costa attraverso le rappresentazioni cartografiche della Calabria.

La prima mappa considerata è quella riprodotta nel noto *Portolano del Mediterraneo* (Fig. 2), eseguito su pergamena dal calabrese Cola di Briatico nel 1430 (Principe, 1989). Qui la graficizzazione dei tratti costieri, elaborata secondo una concezione legata alla navigazione di cabotaggio più che di altura, è restituita mediante un profilo stilizzato che, sia pur poco preciso, mostra la costa caratterizzata da una continua successione di rientranze con forme ad arco e di sporgenze, simboleggianti rispettivamente la presenza di baie e promontori protesi sul mare. Inoltre, a ridosso della linea di costa si differenzia in mare, mediante puntini rossi, la distribuzione di numerose isole e grandi scogli, nettamente distinti dalla linea di riva. Interessante è infine l'osservazione dei toponimi scritti in nero, attraverso i quali il cartografo documenta la presenza di una rete portuale costituita da vari approdi distribuiti lungo la fascia costiera.

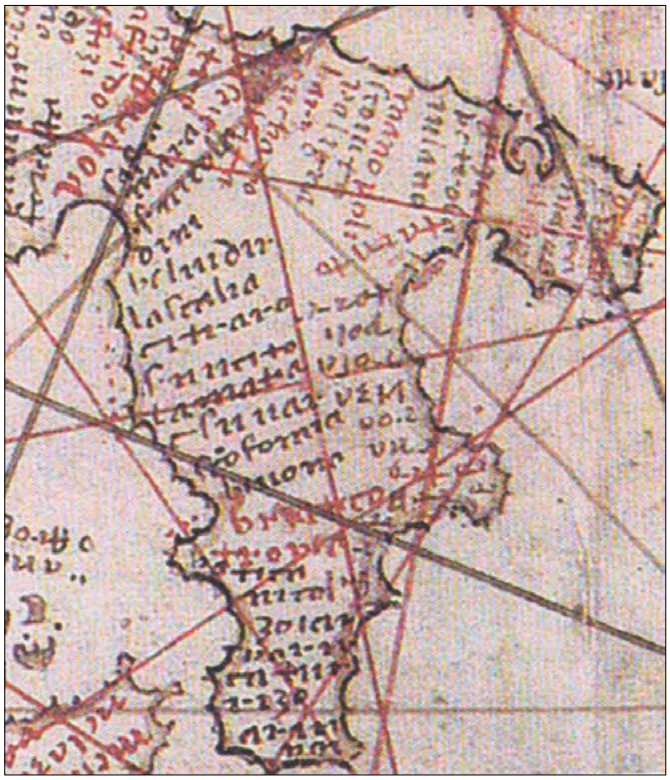


Figura 2. Cola di Briatico. Particolare della Calabria tratto dal *Portolano del Mediterraneo*, 1430.

Per quanto concerne invece il rilevamento della costa nelle carte speciali redatte tra il XVI ed il XVII secolo, di particolare importanza risulta essere la tavola intitolata *Calabriae descriptio* (Fig. 3) dell'archeologo e numismatico cosentino Prospero Parisio, realizzata nel 1589 (Principe, 1989).

Orientata col Nord-Est in alto, la tavola è caratterizzata da una rappresentazione morfologica decisamente più dettagliata rispetto al passato, seppur ancora imprecisa, che consente di definire l'immagine di un perimetro costiero piuttosto frastagliato interessato da agevoli insenature e su cui si intuisce l'incombere dei valichi della Catena Costiera riprodotta

Figura 3. Prospero Parisio. *Calabriae descriptio*, 1589.

dall'Autore con il sistema a "mucchi di talpa", secondo un allineamento che si snoda parallelo alla linea di costa.

La redazione cartografica più importante sul finire del '500 è quella prodotta da Nicolantonio Stigliola e più volte riprese da Mario Cartaro. La *carta della Calabria Citra*, rilevata nel 1595 e inserita nell'*Atlante del Regno di Napoli*, mostra un grado di leggibilità di gran lunga superiore che in qualsiasi altre precedenti carte, in quanto è definita secondo rilevazioni de visu e sulla base di informazioni territoriali posseduti dal governo napoletano, quali carte, disegni e schizzi raffiguranti le coste del Regno (Conti, 2006).

Parallelamente alla produzione cartografica di Stigliola-Cartaro si sviluppa quella del padovano Giovan Antonio Magini, rappresentata nelle mappe dell'*Atlante Geografico d'Italia*, pubblicato postumo nel 1620, dove per la prima volta è inserita la raffigurazione orientata della *Calabria Citra* (Fig. 4), in cui l'immagine del territorio risulta caratterizzata da un articolato rilievo idrografico e orografico, dalla resa precisa del perimetro costiero che nel segmento in oggetto è seghettato dalle numerose foci dei fiumi nonché connotato dalle pronunciate insenature di Belvedere,

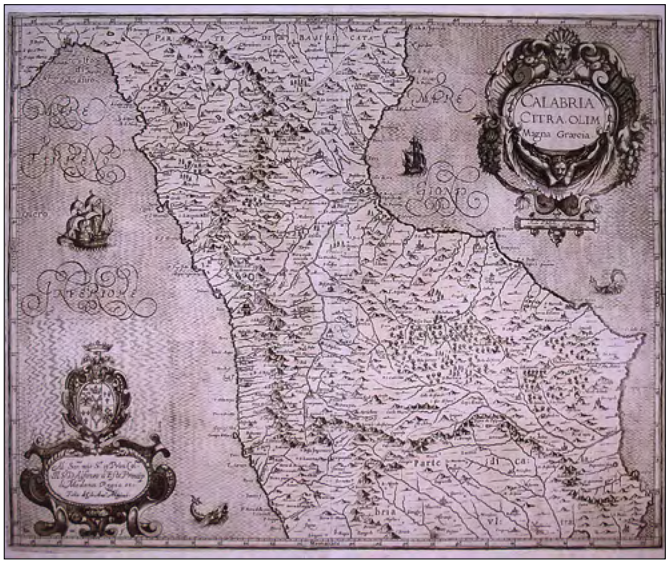


Figura 4. Giovan Antonio Magini, *Calabria Citra*, 1620.

FIGURA 5. *Carta de' Regni di Napoli e di Sicilia* edita da Antonio Boulifon, nel 1692.

di Torre il Tirone immediatamente a sud, di Torre Capo Fella con la baia di Acqua Reparata, di quelle in corrispondenza di Cetraro e Amantea, dalla cospicua presenza di toponimi, pur con qualche inevitabile approssimazione. Le rappresentazioni del Magini, ben eseguite e ritenute molto attendibili, saranno di riferimento e copiate da parte degli altri cartografi per oltre un secolo e mezzo.

Tra le riproduzioni più interessanti anche per le aggiunte che riporta, v'è senz'altro la carta della *Calabria Citra* (Fig. 5) inserita, con molta probabilità, nella *Carta de' Re-*

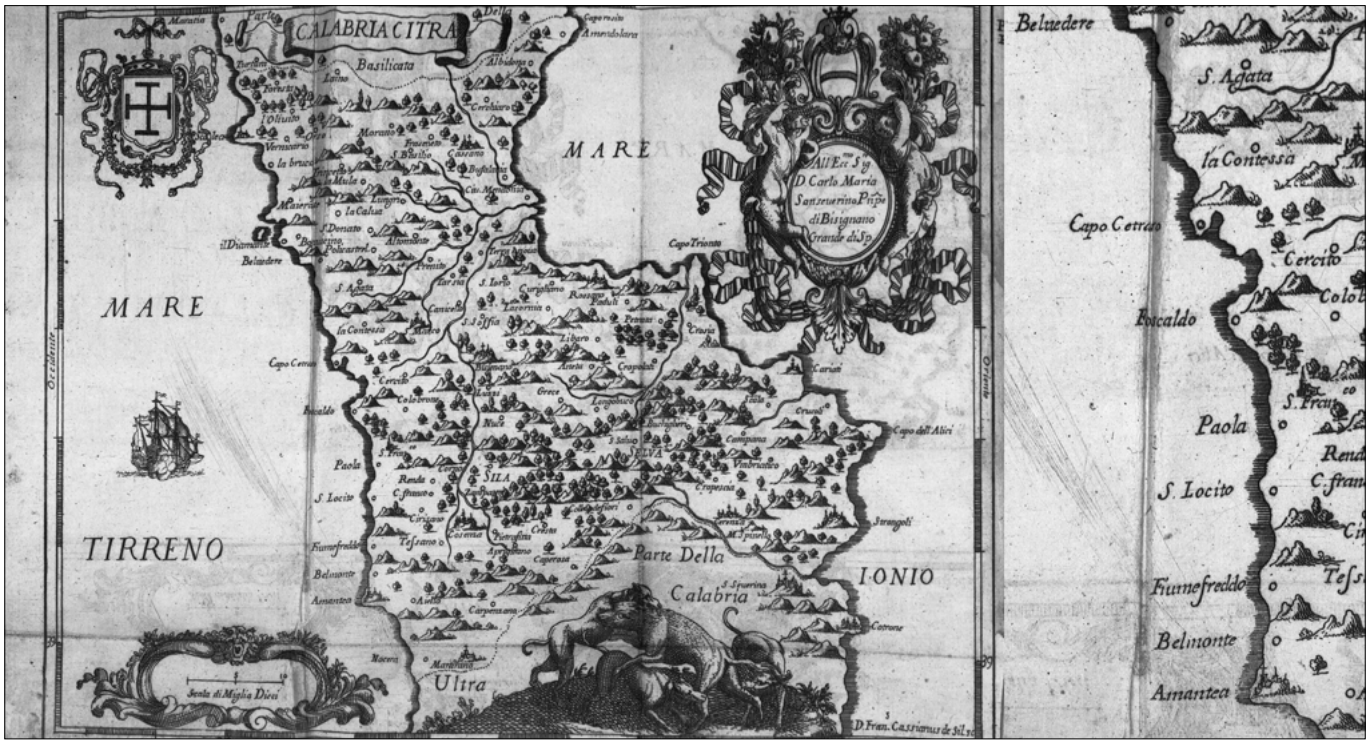


FIGURA 6. Giovanni Battista Pacichelli. A sinistra illustrazione della *Calabria Citra* tratta dall'opera *Del regno di Napoli in prospettiva diviso in dodici provincie*, 1703. A destra particolare della Catena Costiera.

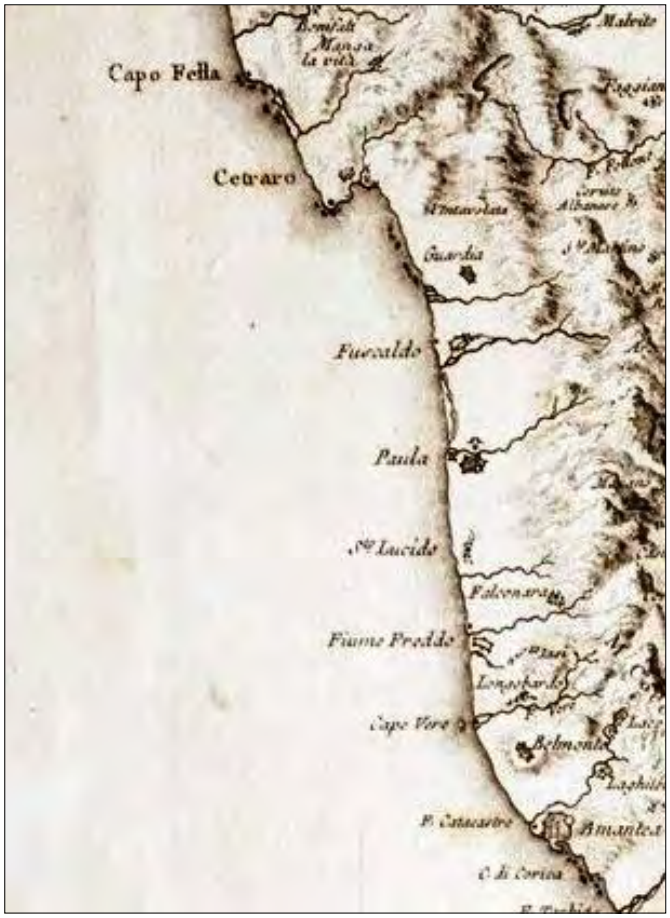


Figura 7. Giovanni Antonio Rizzi Zannoni, *Carta della Sicilia prima*, 1769. Particolare della costa da Capo Fella a Capo Coreca.

gni di Napoli e di Sicilia edita da Antonio Boulifon, nel 1692 (Mollo & Aversa, 2013).

In questa rappresentazione la linea di costa appare molto frastagliata, mentre il disegno dei rilievi, indicati da una baffatura che si protrae quasi immediatamente a ridosso della linea di riva, anche qui indica la presenza di falesie o di coste alte a picco sul mare. Le foci dei fiumi si presentano libere da sedimenti e numerose sono le segnalazioni di piccoli golfi e baie, generalmente riparate dai promontori situati immediatamente a nord. Sono ancora riportate le baie di Capo Tirone, Capo Fella e Acqua Reparata, Capo Cetraro con la sua insenatura, un'ansa poco a sud di Fuscaldo, San Lucido e più a sud le cale di Amantea e Coreca.

Piuttosto interessanti sembrano gli spunti sulla morfologia costiera offerti dalla tavola della *Calabria Citra* (Fig. 6), incisa da Francesco Cassiano de Silva, contenuta nella puntigliosa descrizione dell'abate e cartografo Giovanni Battista Pacichelli, "*Del regno di Napoli in prospettiva diviso in dodici provincie*", opera pubblicata postuma nel 1703. Tale carta, in effetti, sembrerebbe godere di una certa attendibilità nel disegno relativo alla costa del Tirreno calabrese, e in particolar modo del tratto esaminato, in quanto definito sulla base delle informazioni ottenute da esperienze dirette e indirette, sia dell'Autore sia dell'Incisore, e impreziosito dalla rappresentazione di alcune Università.

Nella seconda metà del XVIII secolo, appaiono le straordinarie rappresentazioni pre-geodetiche e geodetiche del padovano Giovanni Antonio Rizzi Zannoni. Di questi particolarmente interessante risulta la configurazione del versante tirrenico settentrionale delineata sulla tavola della Calabria contenuta nella *Carta Geografica della Sicilia Prima*, eseguita nel 1769 (Fig. 7).

L'indagine degli elementi costieri riportati su questa tavola permette di individuare ancora la presenza di baie, come a Cetraro e Amantea, e in altri invece di notare trasformazioni zonali subite dall'ambiente marittimo, com'è nel caso degli scogli localizzati nell'insenatura di Capo Fella, nel tratto di mare antistante il borgo di Cetraro o nei pressi di Coreca, molti dei quali risulteranno interriti alla fine del XVIII secolo, come tra l'altro sembra attestare la mancata segnalazione degli stessi nei rilievi della costa contenuti negli Atlanti eseguiti dallo stesso Zannoni qualche decennio più tardi.

Una traccia odierna della consistenza degli scogli è rappresentata dai resti dell'imponente masso, localmente noto come "*Scoglio della Nave*" (Fig. 8), situato nei pressi della SS 18 in località Sottocastello a Cetraro marina (Iozzi, 2004).

Detto scoglio, che come ricordato da alcune fonti locali veniva usato in antico come elemento di ancoraggio dalle navi per stazionare e far caricamenti nelle acque cetraresi, attualmente dista in linea d'aria circa 40 metri dalla base

Figura 8. Cetraro, loc. Sottocastello. A sinistra veduta dall'alto della rupe e dello Scoglio della Nave che ricolmo di vegetazione si eleva nei pressi della SS 18. A destra particolare del fronte meridionale dello Scoglio.

del contrafforte su cui è innestato l'antico abitato e circa 250 metri dalla linea di riva.

Tra le produzioni del Zannoni si inserisce, ed assume notevole valore di controprova, la *Carta Corografica della Calabria Ulteriore* (Fig. 9), redatta nell'ambito della spedizione scientifica eseguita dopo il terremoto del 1783 dal religioso e studioso Francesco Mango, al secolo Padre Eliseo della Concezione. La carta ha riferimento geodetico, e quindi rientra tra la produzione di carte allestite con procedure che consentono misurazioni dirette del territorio. Nei rilievi dei territori della Calabria meridionale rientrano pure quelli relativi ad alcune località della Catena Costiera poste a nord del Savuto, in cui la formazione degli arenili lungo la costa è definita dal fondo chiaro contenuto tra la linea di riva e il flebile tratteggio in prospettiva dei rilievi. È ancora rappresentato inequivocabilmente un golfo immediatamente a sud dell'abitato di Amantea.

Con queste due ultime carte, oltre ad una restituzione più precisa, si assiste ad un drastico cambiamento della linea di costa che si manifesta con una quasi scomparsa del frastagliamento del litorale, rappresentato invece da tratti molto più regolarizzati, verosimilmente per il deposito di materiale alluvionale lungo la costa, soggetto poi al trasporto litoraneo con direzione prevalente da nord verso sud.

Tra le carte del Zannoni prodotte attraverso il rilevamento geodetico, quelle che maggiormente esaltano il dato informativo è la straordinaria pubblicazione dell'*Atlante Marittimo delle Due Sicilie* (Fig. 10), nella quale particolarmente interessante appare la presentazione dell'esiguo ma dettagliato disegno del litorale, in cui vengono restituite le prime formazioni delle spiagge definite da sfumature di varia tonalità.

Relativamente agli elementi di carattere nautico, vengono segnalate le scogliere, in cui sono citati gli scogli di maggiore entità, e distinte varie cifre in riferimento all'altezza, espressa in metri, dei fondali antistanti la costa compresa tra Belvedere Marittimo e Amantea, lungo la quale inoltre è ben documentata la possibilità di approdo offerta dall'area attraverso la citazione, rispettivamente da Nord a Sud, dei porti di Capo Tirone a Belvedere, Capo Cetraro, Paola e degli scogli di Coreca, nei pressi di Amantea.

Figura 9. Padre Eliseo della Concezione, *Carta Corografica della Calabria Ulteriore*,1783: dettaglio della propaggine meridionale della Catena Costiera a nord del Savuto.

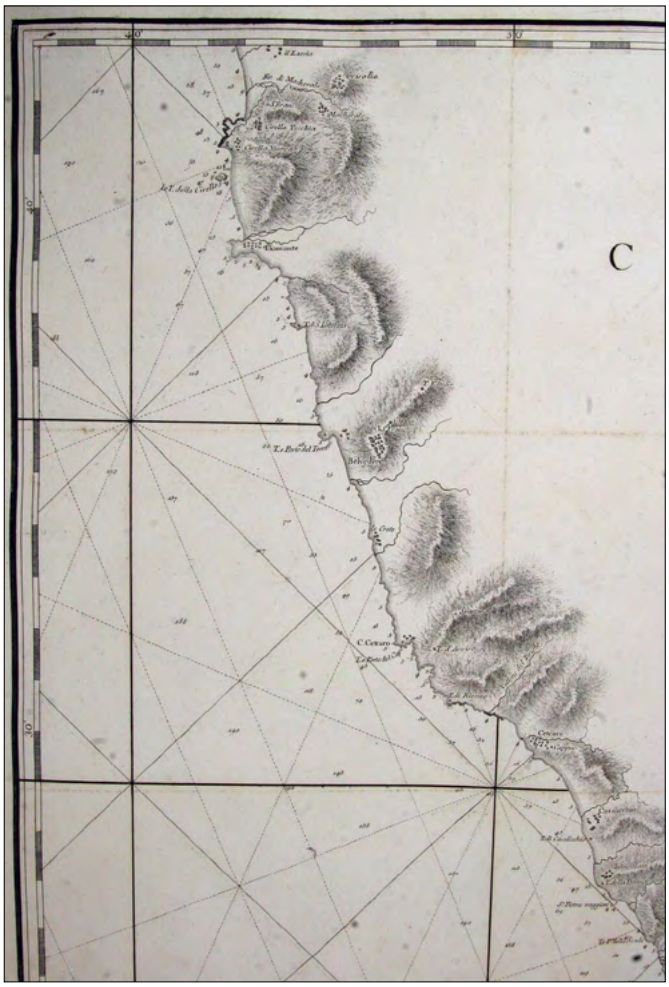


Figura 10. Giovanni Antonio Rizzi Zannoni, *Atlante Marittimo*: tavola 6 relativa alla Calabria Citra, 1782.

Ancora di più alto valore ed attendibilità scientifica sono invece i rilevamenti e le informazioni che il Zannoni fornisce attraverso le rappresentazioni dell'*Atlante Geografico*, delineato tra il 1788 ed il 1811. Quanto rappresentato geograficamente e topograficamente dall'Autore è magnificamente espresso sulle tavole 26 (Fig. 11) e 28 (Fig. 12) dell'Atlante.

L'immagine della costa riprodotta su queste due tavole sembra mostrare una certa familiarità con quella attuale, a dimostrazione di una evoluzione ormai ampiamente avviata. Sono ancora presenti le insenature di Capo Tirone a Belvedere, della Torre del Capo a Cittadella del Capo,

mentre molti approdi della Catena Costiera, sorti a partire dal basso medioevo con funzioni mercantili in corrispondenza dei "*Castrum*" costieri (Dalena, 2008), sembrano essere stati interrati e man mano destrutturati da colmate alluvionali. Tra i più attivi ed importanti porti del Regno di Napoli distrutti dalle colmate figura certamente quello di Cetraro, che ubicato con l'annesso arsenale presso il basso corso del fiume Aron, venne completamente travolto da detriti alluvioni nel 1774 (Tripicchio, 1984) e correttamente riportato dal Zannoni nel suo *Atlante Geografico*.

la loro realizzazione e difesa si sia potuto ricorrere alla costruzione di barriere o moli artificiali.

Per la zona di Amantea l'evoluzione delle costa può essere interpretata da quattro disegni a partire dall'inizio del 1700 circa.

Tra questi v'è l'interessante rappresentazione del Pacichelli (Fig. 13), in cui si nota la città che si eleva sulle pendici della rupe, con il mare a pochi metri. Al margine a sud del centro abitato è segnato un approdo o uno scalo, segnato come molo e figurato dalla presenza di una nave.

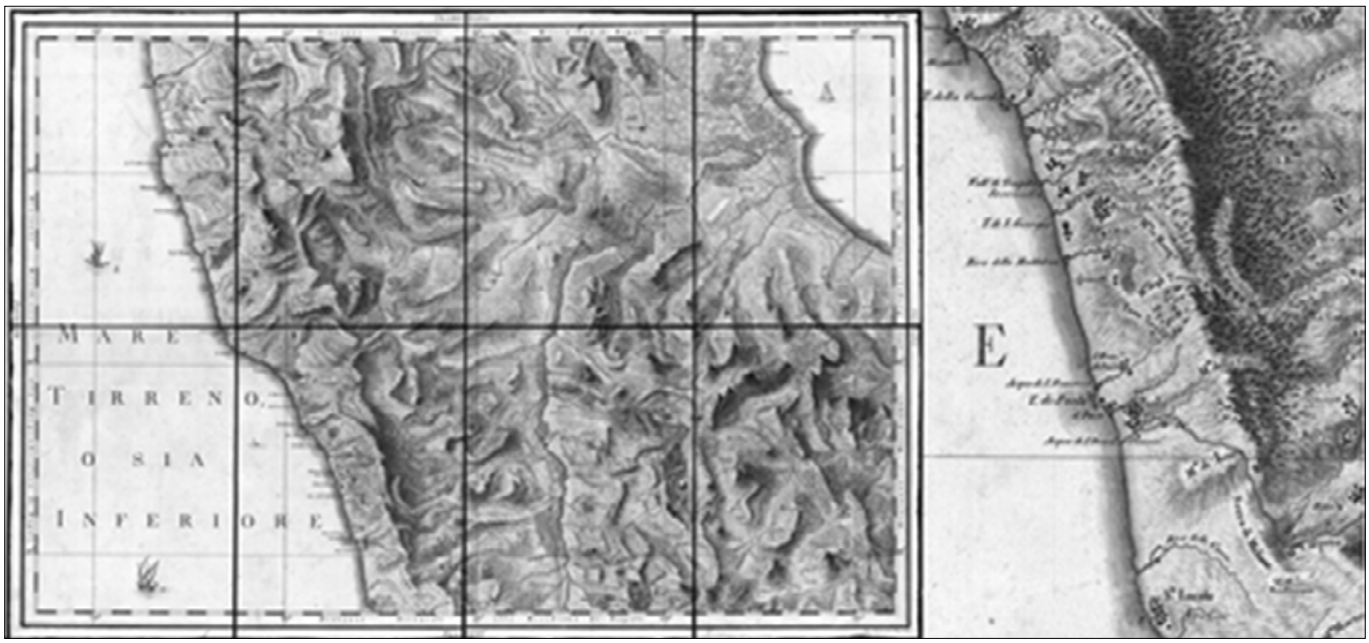


Figura 11. Giovanni Antonio Rizzi Zannoni. A sinistra *Atlante Geografico*: tavola 26 relativa alla Calabria Citra, 1789. A destra particolare di Paola.

Figura 12. Giovanni Antonio Rizzi Zannoni, Atlante Geografico, tavola 28 relativa alla Calabria Citra, Cosenza e parte della Calabria Ultra II, 1789.

Nello stesso Atlante analisi più dettagliata merita il porto di Paola, rappresentato per la prima volta e posizionato immediatamente a sud del promontorio che ospita la torre omonima. È plausibile, dato il regime delle correnti prevalentemente condizionate dal vento di Maestrale, che nelle zone sottovento, cioè a sud dei promontori, non sia ancora avvenuta la deposizione del trasporto solido litoraneo e continuino ad essere preservate piccole baie o insenature che favoriscono gli approdi, senza poter escludere che per

L'ipotesi dell'esistenza di un porto o di una cala, oltre che dalle fonti storiche, è anche confortata dalla toponomastica poiché tali luoghi sono conosciuti con i nomi di "Calavecchia", forse per indicare una discesa a mare, e "Paraporto", nome di una delle due porte d'accesso alla città.

L'insenatura è anche chiaramente riportata nella carta del Zannoni del 1769 ed esiste ancora nella carta di Padre Eliseo della Concezione del 1783 mentre non è possibile

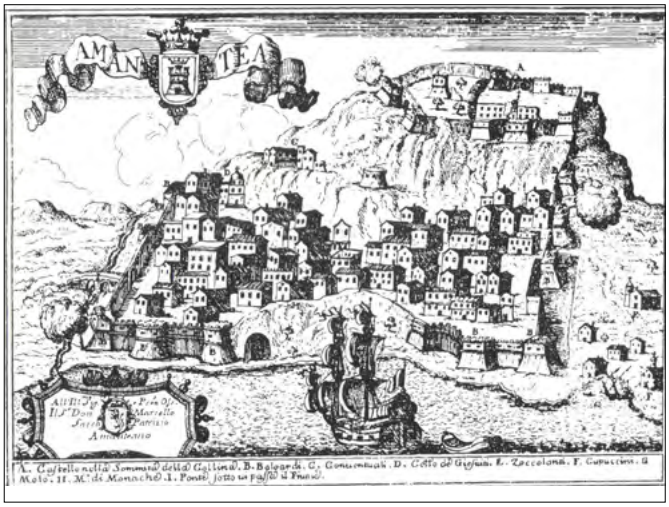


Figura 13. Giovanni Battista Pacichelli, *Veduta della città di Amantea* della fine del XVIII secolo. Illustrazione tratta dall'opera *Del Regno di Napoli in prospettiva*.

desumerla chiaramente dal disegno intitolato *Stralcio della prospettiva della città di Amantea*, eseguito da Ermenegildo Sintes nello stesso anno. La modifica della fisiografia, con la colmata dell'insenatura, inizia a delinearsi nell'Atlante del Zannoni del 1789 ed è ancora più evidente dal particolare della *Veduta di Amantea*, eseguita da Antonio Berotti nel 1795 (Fig. 14), poiché la spiaggia sotto le mura è già formata e, addirittura, vi sorge una importante costruzione, forse Palazzo Florio, nonché il rione Taverna nei pressi del punto di approdo indicato da Pacichelli. In pochi anni, dunque, dovette succedere un evento, o una serie di eventi, capaci di modificare uno storico approdo attivo per secoli.

Ancora più dettagliati nella linea di costa appaiono i due disegni di Amantea del 1812 realizzati dal pittore berlinese

Figura 14. Antonio Berotti – *Veduta di Amantea in un disegno del 1795.*

Franz Ludwig Catel (Fig. 15), che prese parte alla spedizione in Calabria intrapresa dal colto archeologo Aubin-Louis Millin, direttore del Reale museo Antichità di Parigi, dove si nota un maggiore avanzamento della linea di costa e un piccolo golfo verso sud.

Nello stesso viaggio, i protagonisti del Gran Tour, con un bellissimo disegno a penna e acquerello intitolato *Passage du Savuto entre Amantea et Nocera* (in realtà è il passaggio del fiume Oliva), rappresentano una veduta del golfo di Coreca, poco più a sud (Fig. 16). Il disegno è importante perché mostra la baia protetta dallo scoglio e da Capo Coreca (quasi sempre rappresentati in tutte le cartografie) nel periodo in cui sta iniziando l'apporto di sedimenti, tanto che la zona è rappresentata come se fosse quasi impaludata.

Pochi anni più tardi, tra il 1821 ed il 1825 lo Stato Maggiore austriaco aggiornerà le rappresentazioni con la pubblicazione della *Carta Austriaca del Regno di Napoli* (Fig. 17 e 18),

in cui si rileva la presenza certa degli arenili, indicata mediante campiture in ocra chiaro, che in molte zone rappresenta una progradazione della linea di costa. In effetti molte delle aree costiere, che nelle carte più antiche apparivano caratterizzate da rade, sono ora occupate da superfici di colmature, sempre distinte in ocra chiaro, come in corrispondenza di Amantea, nel tratto tra San Lucido e Paola, Paola e Fuscaldo e a nord di Cetraro. Persistono i pochi

Figura 15. Franz Ludwig Catel, *Amantea, vue en deux feuilles*, 1812 (da catalogue.bnf.fr).

Figura 16. Franz Ludwig Catel, *Passage du Savuto entre Amantea et Nocera*, 1812.

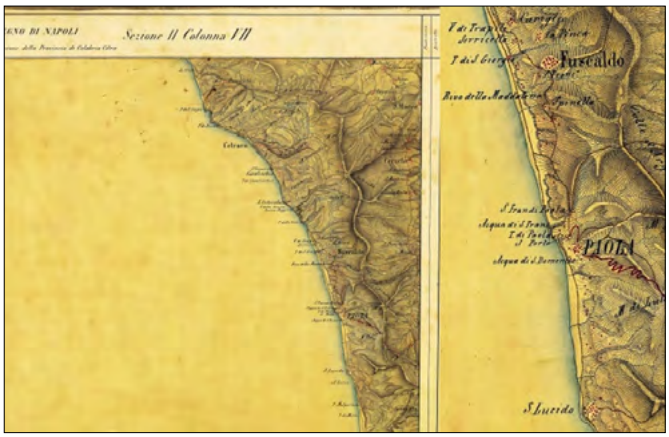


Figura 17. Stato Maggiore austriaco. A sinistra Carta austriaca del Regno di Napoli, Foglio Sez. 11 – Colonna VII, 1821 -25: a destra porzione del litorale da Fuscaldo a San Lucido.

Figura 18. Stato Maggiore austriaco. Particolare della fascia costiera tra le località di Fiumefreddo e Amantea tratto dalla Carta austriaca del Regno di Napoli, Foglio Sez. 12 – Colonna VII, 1821-25.

promontori ove ancora non è completamente avvenuto l'avanzamento della spiaggia, tra cui quello di San Lucido.

Relativamente a quest'ultima località, lo scrittore Alexandre Dumas, nel racconto Viaggio in Calabria del 1835 durante il suo rientro da Cosenza verso la costa tirrenica, riporta: *Ai nostri piedi era San Lucido e nel suo porto, simile ad una di quelle piccole navi che i bambini fanno galleggiare nelle vasche delle Tuileries, vedemmo ondeggiare il nostro elegante e grazioso "speronare" che ci aspettava*. Dunque a San Lucido, così come avvenuto in passato, esisteva ancora un porto o, quantomeno, un approdo. Solo per Paola rimane l'indicazione certa del porto, morfologicamente ancora protetto da una cuspide, forse una barra.

La regolarizzazione della linea di riva è classificabile come l'inizio della costruzione di una costa bassa sabbioso-ghiaiosa, certamente ancora distante dai valori di massimo avanzamento. I dettagli della carta fanno notare inoltre come tutte queste pianure litoranee di riempimento siano già interessate da tracciati stradali, a dimostrazione dell'immediato sfruttamento del nuovo scenario costiero nei processi di sviluppo socio-economico del territorio.

Dello stesso periodo altrettanto interessanti per una lettura della topografia costiera e non solo, sono le carte redatte dal geografo pugliese Benedetto Marzolla, tra cui l'*Atlante corografico storico e statistico del Regno delle Due Sicilie* pubblicato nel 1832 (Fig. 19), nella quale si distingue il rilevamento di una strada non rotabile articolata su quote differenti lungo tutto il litorale della Catena Costiera. La presenza di questa strada parrebbe suggerire l'impiego e la praticabilità di una zona costiera parzialmente soggetta a paludismo.

Anche con questa carta si continua ad evidenziare lo stato della regolarizzazione della costa e la sua progradazione. L'avanzamento è evidente, per esempio, nel territorio di Guardia P.se dove il reiterato apporto terrigeno del fiume Bagni, a partire dalle prime notizie storiche di frane del 1826, provocò la destrutturazione dell'intera area termale e del vicino villaggio e, nei decenni successivi, anche l'avanzamento della linea di riva via via fino ad inglobare lo scoglio, spesso indicato sulle carte antiche col nome di "Pietra Grande" (oggi Scoglio della Regina), situato poco a nord della foce del fiume Bagni e che oggi, da poche decine d'anni, si ritrova nuovamente in mare a più di 50 m dalla riva a causa dei recenti fenomeni di erosione costiera.

Ad ultimare il lavoro di analisi della cartografia antica è stata l'osservazione delle carte post-unitarie, e quindi delle raffigurazioni cartografiche prodotte sotto il coordinamento dell'Ufficio Superiore dello Stato Maggiore, dal 1882 denominato Istituto Geografico Militare. Particolare attenzione è stata prestata all'immagine della costa riportata sui fogli relativi al Tirreno calabrese contenuti nella *Carta delle Provincie Meridionali* meglio conosciuta col nome di *Sesto Antico*, prodotta tra il 1873 e il 1876, e nella *Carta della Provincia di Cosenza* prodotta dopo il 1895 (Fig. 20). Relativamente al rilievo del profilo costiero si può dire che quanto attentamente delineato su queste carte poco si discosta da quello delle carte pre-unitarie così come dall'attuale visione, con un continuo trend di avanzamento delle spiagge.

L'affidabilità dei contenuti cartografici, inoltre, consente di capire chiaramente il livello di pianificazione dello spazio costiero raggiunto all'epoca e di circoscrivere l'inizio di una maggiore incidenza del cosiddetto "ambiente costruito" nella destrutturazione delle aree marine di più recente assestamento dove a farla da padrone sarà prevalentemente l'azione antropica applicata sul territorio per la costruzione delle varie infrastrutture, in particolar modo quelle legate alle industrie, allo sviluppo urbano e turistico, alla fitta rete di infrastrutture viarie e di trasporto.

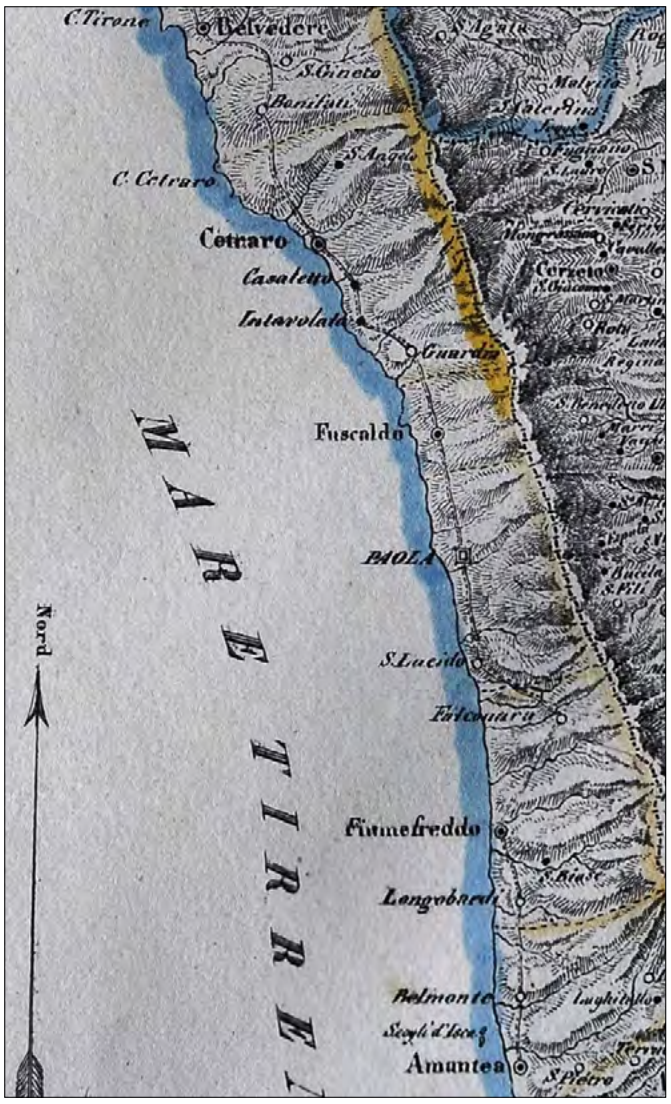


Figura 19. Benedetto Marzolla: Carta della Provincia di Calabria Citra, 1831. Particolare della costa da Capo Tirone di Belvedere ad Amantea, lungo cui è segnalata la presenza di una strada non rotabile.

Figura 20. Istituto Geografico Militare, Carta della Provincia di Cosenza.

CONSIDERAZIONI SULLA VARIAZIONI DELLA LINEA DI COSTA

Per le finalità di questo studio e a parità di altre condizioni, ciò che condiziona l'esistenza di una spiaggia, il suo avanzamento o arretramento, è il risultato del bilancio morfogenetico in funzione degli apporti sedimentari, intesi come il risultato di cause ed effetti che, inevitabilmente, vi concorrono (Pranzini, 1994). Una sua ricostruzione "nel tempo", in senso paleo-geografico (o storico-geografico), necessita però della conoscenza dei fattori che ne hanno potuto determinare una sua variazione, tra cui almeno quattro di fondamentale importanza:

1. livello del mare,
2. livello del suolo,
3. variazioni climatiche,
4. attività antropiche.

1) Per quanto riguarda la generale variazione del livello del mare di questa porzione del mediterraneo, esiste una ampia e complessa letteratura al riguardo, la quale è concorde nello stabilire che negli ultimi 2000 anni il livello del mare sia risalito mediamente di circa 1,00 m (Alessio *et alii*, 1996).

Oltre a ciò bisogna tener conto anche dei tassi di sollevamento o di subsidenza valutabili zona per zona, che determinano variazioni locali che non permettono di assegnare un valore assoluto del sollevamento del livello marino per tutte le coste del mediterraneo (Lena, 2020).

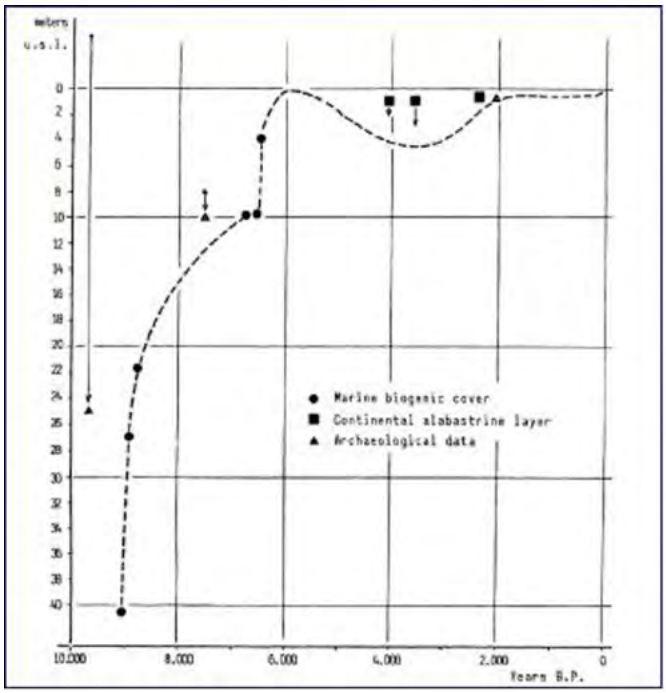


Figura 21. Curva di risalita del livello del mare da 9.000 anni ad oggi.

2) Molto si è studiato sui movimenti verticali della costa calabrese, comprendendo le cause più comuni quali isostasia, subsidenza, tettonica ecc. In questo campo le ricerche sono in atto già da moltissimi anni, specialmente nell'ambito delle conoscenze della geodinamica dell'Arco Calabro e riguardano i sollevamenti delle ultime migliaia di anni (Fig. 22), soprattutto riferiti ad indicatori archeologici, morfologici e tettonici (si veda, p.e., Sorriso Valvo & Sylvester, 1993, An-

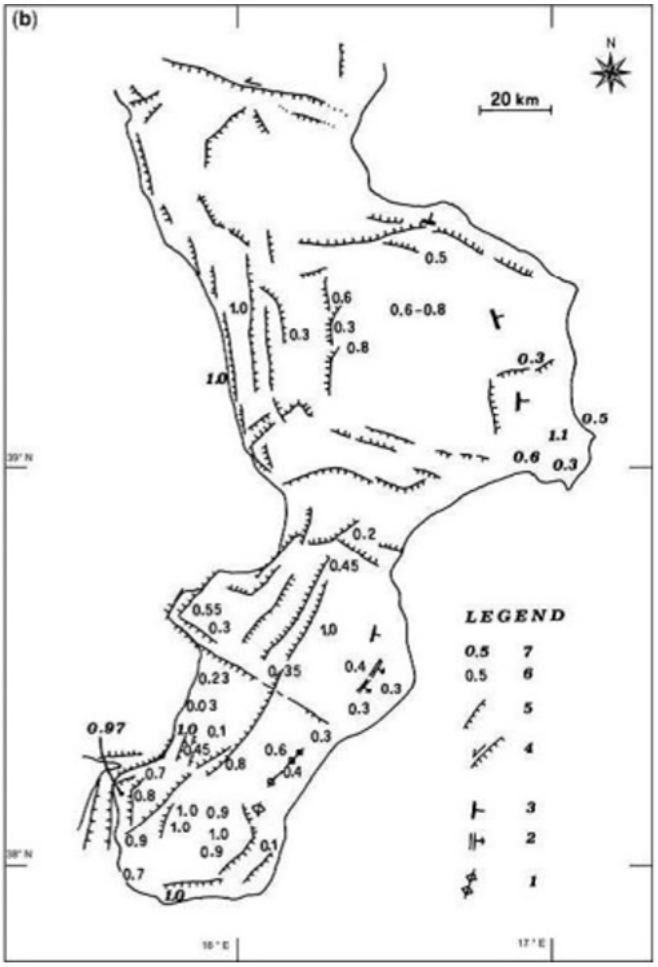


Figura 22. Tassi di sollevamento dell'orogene calabrese in mm/y.

tonioli & Ferranti 1996, Anzidei *et alii* 2006, 2012, Pepe & Sulli, 2013, Lambeck *et alii*, 2011, Lena, 2020).

Se per le porzioni centro-meridionali del Tirreno calabrese le ricerche dimostrano una generale compensazione tra sollevamento tettonico e innalzamento del livello del mare, per il settore centro-settentrionale questo studio evidenzia, invece, come l'aumento del livello marino, nello specifico, non sia stato compensato da un sollevamento dell'area crostale.

Infatti le osservazioni effettuate nei pressi di località Càvinia, poco a sud di Acqua Reparata (attualmente Cittadella del Capo), si sono focalizzate sul rinvenimento di una cava lapidea litoranea da cui si estraevano macine o, più probabilmente, rocchi di colonne (Fig. 23), la cui datazione è ancora in fase di studio.

Figura 23. La cava di località Càvinia.

Il sito è formato da un *plateau* inclinato costituito da scisti sericitici, che dalla terraferma degrada verso il mare fino ad una profondità di circa 4 metri (Marino *et alii*, 2018) (Fig. 24).

Appare evidente che in questo particolare settore della Calabria si è avuto un abbassamento dell'area invece che un innalzamento.

Figura 24. Il *plateau* inclinato della cava visto dall'alto.

3) Se molto si è scritto sulle variazioni eustatiche, solo in tempi relativamente recenti si è tenuto conto delle variazioni climatiche (Sagnotti, 2019), dei suoi effetti sulle attività antropiche e, conseguentemente, delle implicazioni sulla morfologia delle coste (Ortolani, 2001). Ancora più importante è comprenderne le variazioni (nel tempo e nello spazio) e, soprattutto, come (e quanto) le variazioni climatiche abbiano influito sui processi geomorfologici locali.

Diversi studi multidisciplinari attestano generali variazioni climatiche con cicli di circa 1000 anni, in cui si susseguono periodi caldi, seguiti da periodi di transizione, poi periodi freddo umidi e ancora transizioni (Ortolani, 2001), anche se più in dettaglio si possono cogliere alcune differenze sia per le diverse aree geografiche sia per una certa asincronia (Mariani, 2016). Ciò è verosimilmente imputabile a diversi fattori, tra cui: i dati non sono ancora sufficienti per una definizione generale, i risultati possono variare in base al tipo di dati analizzati, deve essere considerato un lasso di tempo tra cambiamento climatico e il tipo di effetto riscontrato, il cambiamento non è stato sincrono o non si è verificato in modo generalizzato in tutte le regioni del Pianeta.

Comunque si è concordi nell'ipotizzare una ciclicità dei fenomeni di progradazione e regressione in relazione alle variazioni climatiche. È noto infatti che durante i periodi freddo-umidi a maggiore piovosità e per la durata di circa 100-200 anni, le zone acclivi sono state caratterizzate da una marcata instabilità geomorfologica che ha innescato intensi fenomeni erosivi e dissesti lungo i versanti, nonché il trasporto e l'accumulo di ingenti volumi di sedimenti nelle pianure alluvionali e lungo le coste. L'accumulo di sedimenti, a prevalente composizione silicoclastica, ha causato una rapida aggradazione della superficie del suolo delle pianure e una marcata progradazione dei litorali sabbioso-ghiaiosi, contribuendo significativamente alla costruzione delle pianure alluvionali costiere. Durante i periodi caldo-aridi, compatibilmente con la diminuzione dei giorni di pioggia e delle precipitazioni, è possibile ipotizzare una

maggiore stabilità dei versanti e una minore disponibilità di materiale alluvionale e di sedimenti, con fenomeni di desertificazione delle aree costiere meridionali. Il risultato è una più immediata e marcata tendenza all'erosione delle spiagge, solo minimamente compensata da apporti bioclastici, con conseguente arretramento della linea di costa (Buonomo *et alii*, 2006) (Fig. 25).

4) Se in una esemplificazione dei rapporti causa/effetti, trovano immediato riscontro gli eventi catastrofici, meno diretta è l'analisi del rapporto clima/uomo. Infatti, per l'immaginario comune è facile associare pioggia/alluvione, pioggia/frana ecc. così come, nel campo geomorfologico, è immediato associare apporti-sedimentari/spiaggia. Negli ultimi anni però, sono in aumento gli studi che considerano anche gli effetti che il clima ha avuto sulla popolazione e sulle attività umane e, conseguentemente, le ricadute che le attività umane hanno avuto sulla stabilità e conservazione del suolo o, se si preferisce, al contrario, sull'instabilità dei versanti.

Bisogna ricordare che il progresso economico e sociale, fino ai tempi della grande distribuzione ovvero fino alla metà del 1900, derivava principalmente dalla disponibilità di risorse alimentari e produttive. Le prime, più di qualsiasi altre, fondamentali per la sopravvivenza e il benessere nonché per la crescita demografica, dipendevano in primo luogo dalle condizioni climatiche presenti in un determinato periodo e in una determina regione.

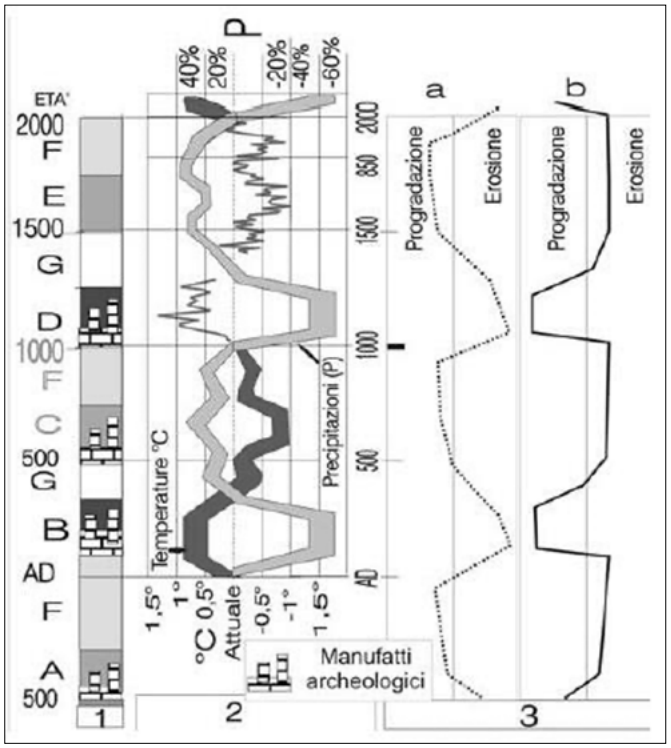


Figura 25. Sintesi dei dati relativi alle modificazioni stratigrafiche e morfologiche delle pianure costiere antropizzate del Mediterraneo (colonna 1), alla ricostruzione della variazione delle precipitazioni e temperature (colonna 2) e delle spiagge con sabbia organogena (a) e silicoclastica (b) in colonna 3. I periodi più freddi e piovosi in colonna 1 sono stati chiamati Piccola Età Glaciale Arcaica (A) (500-300 a.C.), Piccola Età Glaciale Altomedievale (C) (500-700 d.C.) e Piccola Età Glaciale (E) (1500-1750). I periodi più caldi e aridi che hanno interessato la parte centro meridionale del Mediterraneo sono stati chiamati Periodo Caldo Romano (B) (150-350 d.C.) e Periodo Caldo Medievale (D) (1100-1270).

Le condizioni climatiche, che più marcatamente a partire dal XVI secolo si manifestarono con un drastico abbassamento delle temperature e un aumento delle precipitazioni, note come Piccola Età Glaciale (PEG), tormentarono tutta l'Europa ma, probabilmente, solo successivamente ebbero effetti in Calabria, dove i dati raccolti indicano un ritardo di circa due secoli, più correlabili all'aumento della piovosità (Ortolani & Pagliuca, 2004).

In queste zone per far fronte ad inverni sempre più freddi e piovosi, le popolazioni diedero inizio a quella che può essere considerata una piccola lotta per la sopravvivenza, in cui un'economia esclusivamente agricola e rurale non consentiva altri sostentamenti se non quelli derivanti dalla diretta coltivazione della terra e dallo sfruttamento delle risorse forestali. Ciò si tradusse, tra l'altro, in un taglio significativo delle zone boscate sia per ricavarne legna da ardere o per far carbone (e in occasione di terremoti anche legname da costruzione) sia per aumentare le superfici da destinare a colture, in considerazione delle scarse rese della produzione agricola (Osso *et alii*, 2018).

I PROCESSI GEOMORFOLOGICI DA DATI STORICI

Che la Calabria sia terra di frane e di alluvioni è un fatto noto, tanto che la definizione per antonomasia è "uno sfasciume pendulo fra i due mari", dovuta a Giustino Fortunato nel 1904. Le cause, ampiamente studiate, sono riconducibili proprio alla sua genesi geologica e alla complessa evoluzione tettonica, morfologica e climatica.

In realtà, la percezione comune delle genti calabresi, più che le frane, temeva l'acqua. Piovana o corrente, poco importava: essa attivava (o ri-attivava) le frane, trasportava detriti, straripava e distruggeva cose, case e tutto ciò che incontrava. E quando stagnava era causa di malaria.

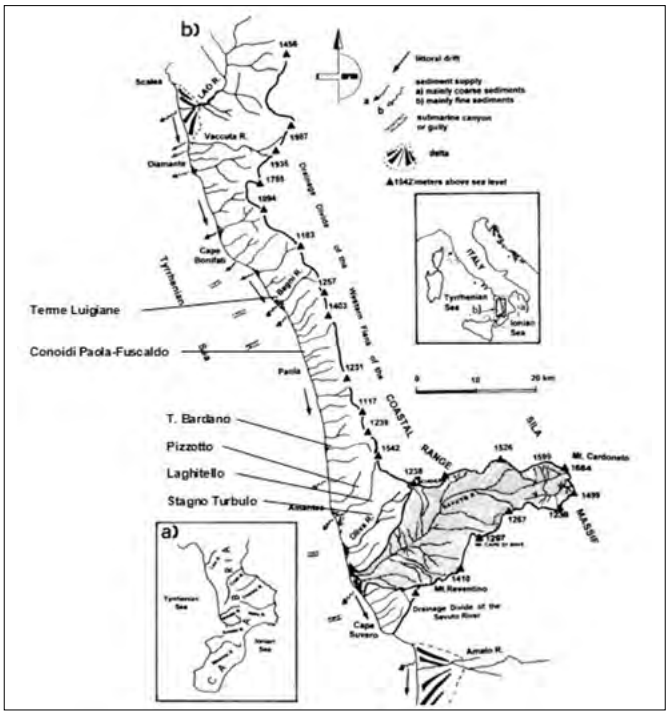


Figura 26. Mappa schematica della Catena Costiera con indicazione dei tipi di sedimenti e trasporto litoraneo con indicazione delle frane descritte nel testo.

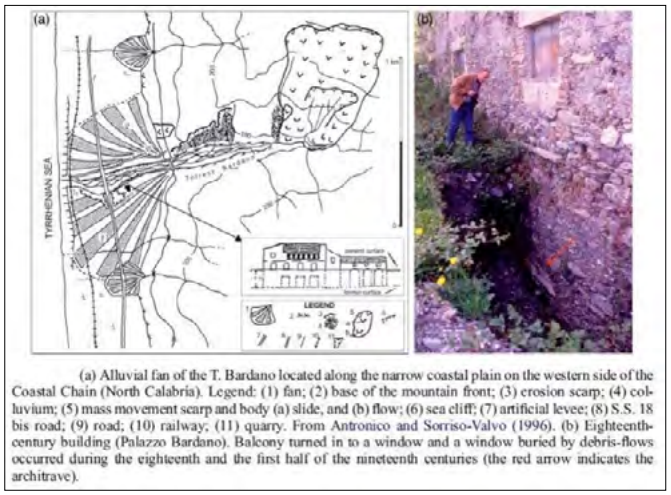
Oltre che alle scosse sismiche (di cui i terremoti del 1783 rappresentano un evento tra i più devastanti con 182 paesi distrutti, 29.000 morti, sconvolgimenti del suolo e frane che provocarono almeno 215 laghi di sbarramento), molti studi hanno evidenziato che, a partire dal XVIII – XIX secolo, lungo i versanti della Catena si è registrato un significativo sviluppo di frane con conseguente apporto di sedimenti nei tratti vallivi e, successivamente, lungo i litorali della Catena Costiera. Spesso tali apporti sono stati trasportati con processi di colate detritiche assumendo le forme di delta-conoidi la cui attività, così come quella dei dissesti, è stata caratterizzata da fasi intermittenti (Antronico *et alii*, 2016).

Nel seguito si riportano alcuni degli esempi più emblematici di cui si hanno notizie storiche, descritti per data, lungo la Catena Costiera, (Fig. 26).

Il primo esempio è il conoide del T. Bardano nel comune di Longobardi, le cui colate detritiche, in una fase parossistica, invasero e coprirono un intero livello di un fabbricato per un'altezza di oltre 4 m nonché un vasto areale di deposito sotto forma di fan delta (Fig. 27).

L'età dell'evento, ricavato da datazioni col metodo del radiocarbonio dei materiali organici inglobati nel deposito, risale alla seconda metà del 1700.

Più a nord è da annoverare la frana delle Terme Luigiane (Fig. 28), le cui prime notizie della sua attivazione risalgono al 1826 (Antronico & Sorriso-Valvo, 2010), poi descritta storicamente dall'Arnoni*: "Di fronte alle sorgive, spezialmente dalla parte meridionale del vallone, sorge un povero villaggetto, che in tutto offrirà un trenta o quaranta stanze, di cui quelle più prossime al fiume sono di spettanza del Comune di Guardia, le quali, a causa di parecchie piene prodotte dalle stemperate piogge, e dal liquefarsi della neve de' vicini monti, nell'inverno e nella primavera del 1874, insieme con le benefiche sorgive delle acque termali, vennero sotterrate dall'impeto del fiume, che, uscendo dal suo letto ordinario, allagò tutte le circostanti campagne. Il fiume in parola, dal 1867 fin qua, si è rialzato sopra il suo letto meglio di 12 metri. La causa di sì fatto innalzamento, e dell'amplificazione dell'alveo, si ripete dallo improvvido e dissennato sradicamento dei monti soprapposti, che nel 1868 vennero con poca prudenza civile spartiti a quote; e però, distrutto il bosco*



(a) Alluvial fan of the T. Bardano located along the narrow coastal plain on the western side of the Coastal Chain (North Calabria). Legend: (1) fan; (2) base of the mountain front; (3) erosion scarp; (4) colluvium; (5) mass movement scarp and body (a) slide, and (b) flow; (6) sea cliff; (7) artificial levee; (8) S.S. 18 bis road; (9) road; (10) railway; (11) quarry. From Antronico and Sorriso-Valvo (1996). (b) Eighteenth-century building (Palazzo Bardano). Balcony turned in to a window and a window buried by debris-flows occurred during the eighteenth and the first half of the nineteenth centuries (the red arrow indicates the architrave).

Figura 27. Conoide alluvionale del torrente Bardano situato lungo la stretta pianura costiera sul lato orientale della Catena Costiera

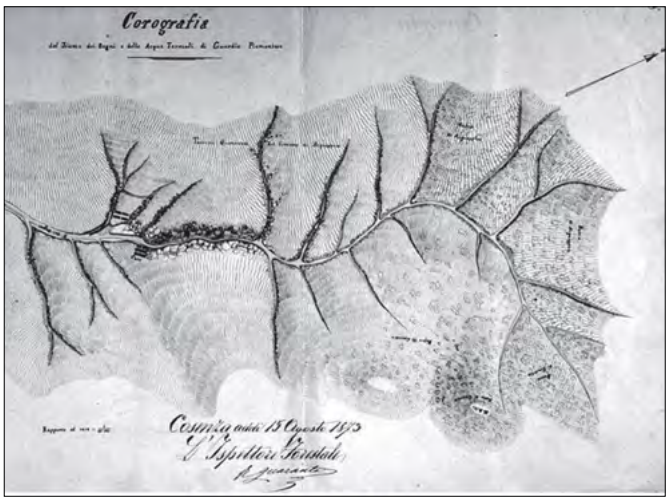


Figura 28. Corografia dell'epoca del Fiume Bagni e del seppellimento delle Terme Luigiane.

e sbarbicato il terreno di natura franoso, si è di leggieri e in picciol tempo dilavato, solcato, e smottato in diversi punti, formando spaventevoli burroni soggetti a frequenti corrosioni, e frane, le quali vengono poi dalle piogge trasportate nel sottoposto alveo" (Palmieri *et alii*, 2011).

Più a sud è da citare la frana di sbarramento sul Fiume Oliva, nel comune di Aiello Calabro, con foce a sud di Amantea, che generò una palude e, da questa, un'epidemia malarica i cui decessi arrivarono fino al 75% della popolazione che viveva nei paesi limitrofi (Fig. 29).

La data certa della formazione è fornita da una Relazione Ministeriale in cui si attesta che l'origine dello stagno risale al 1844: "*da quando, per inconsulti disboscamenti, nei monti da cui scende il Maiuzzo si produssero considerevoli frane e le piene trasportarono cosi grande quantità di materie da formare, quasi d'un tratto, un grande cono di deiezione entro l'alveo dell'Oliva, e la insenatura, che esisteva in destra del fiume stesso, rimase senz'altro priva di scolo, e convertita in triste palude*".

Nel bacino del Fiume Catocastro, che sfocia poco più a nord di Amantea, intorno alla metà del 1850 si innescarono due frane molto importanti e conosciute.

La prima, all'interno del bacino del F. Acero, affluente in sinistra idrografica, riguarda la frana di Laghitello (Fig. 30) la cui riattivazione iniziò nel 1851 e culminò con l'ordinanza di abbandono dell'omonimo borgo nel 1927. La velocità di movimento si mantenne molto lenta e costante fino al 1880 per poi aumentare repentinamente con fasi parossistiche nel 1882, 1910, 1917/18 e 1926/27, in concomitanza di precipitazioni a carattere alluvionale e di piene eccezionali che accelerarono sempre più i processi in atto. In poco meno di 50 anni, dal 1880 al 1930 circa, un intero borgo fu distrutto e più di 1300 abitanti dovettero sgomberare le loro case perché irrimediabilmente danneggiate (Osso *et alii*, 2011).

Il secondo caso, sempre nello stesso bacino idrografico e appartenente al più noto *sackung* di Lago, è la imponente frana di Pizzotto (Fig. 31), con un fronte erosivo di 1300 m, larghezza di 420 m e profondità di oltre 100 m, per un'area totale di 0.56 kmq. Il volume eroso è di $15x10^6$ mc; il volume di materiale trasportato nelle porzioni prossime al litorale, in mare o lungo la spiaggia, è stato stimato in ben 5,6x106 mc. (Sorriso-Valvo *et alii*, 1997).

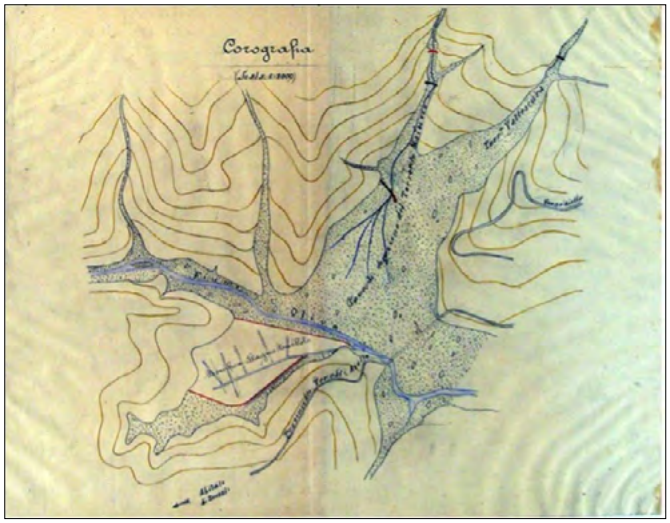


FIGURA 29. Corografia originale di progetto della bonifica dello Stagno Turbolo (1903) che mostra il conoide alluvionale in alto a destra e il lago di sbarramento in basso a sinistra.

I dati storici, confermati dagli studi dendrocronologici, datano l'inizio dei movimenti franosi a partire dal 1863 in occasione di piogge eccezionali, con successive rimobilizzazioni quasi sempre nel periodo invernale e comunque sempre in occasione di fenomeni piovosi. Le maggiori cause scatenanti della mobilizzazione sono state individuate in primo luogo nei fattori climatici ma anche nella deforestazione della zona a seguito dello sviluppo dell'agricoltura (Sorriso-Valvo *et alii*, 1999).

L'elenco potrebbe comprende anche i noti fenomeni di modellamento e di riattivazione del *sackung* di San Lucido e delle sue frane più superficiali, dei conoidi di Paola e Fuscaldo (Robustelli *et alii*, 2005, Fig. 32) e altro ancora considerato che, nella Catena Costiera, non c'è praticamente bacino idrografico che non abbia fenomeni di dissesto geo-idrologico al suo interno (Antronico *et alii*, 2016; Le Pera & Sorriso Valvo, 2000).

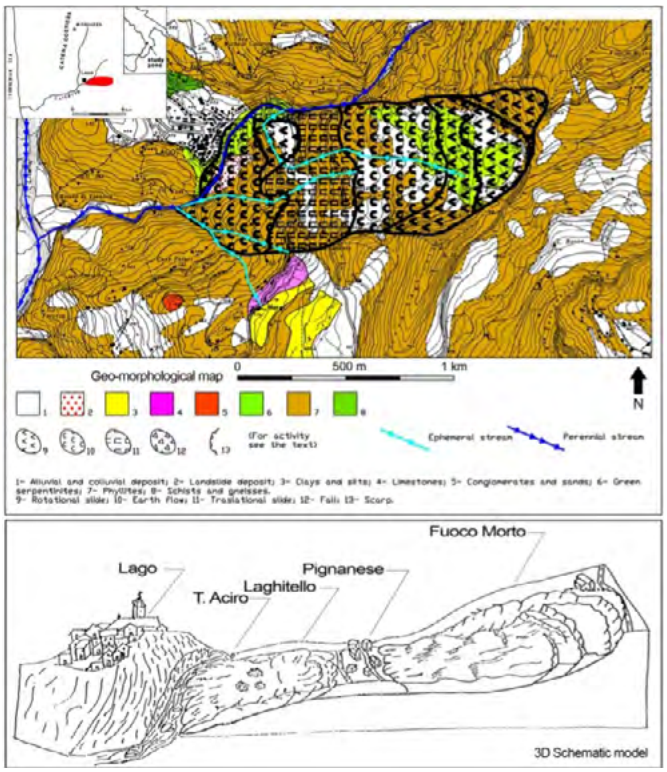


FIGURA 30. Schema geomorfologico della frana di Laghitello.

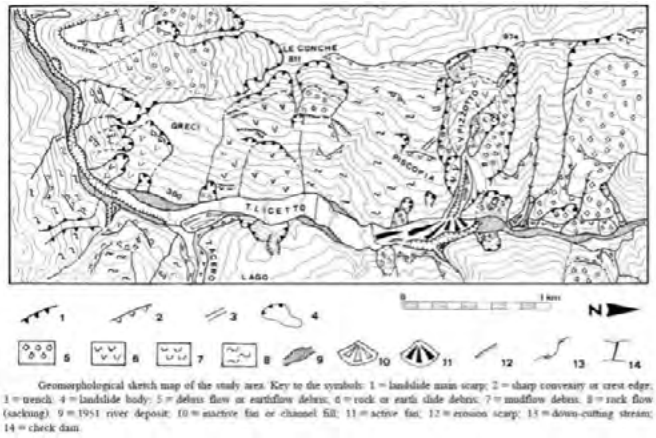


FIGURA 31. Schema geomorfologico della frana di Pizzotto.

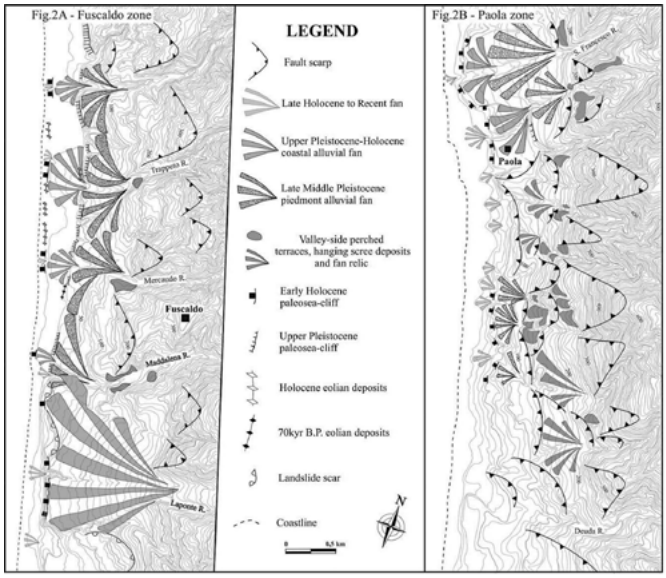


FIGURA 32. I conoidi alluvionali tra Paola e Fuscaldo.

CONCLUSIONI

I dati analizzati desunti dalla cartografia, dalle notizie storiche e dai dati geologici, evidenziano che in questo settore di Calabria i cambiamenti più marcati della linea di costa sono avvenuti a partire dalla seconda metà del 1700, con un repentino impulso in poche decine d'anni, e poi con fenomeni sempre più frequenti per tutto il 1800, proseguiti fino alla metà del secolo successivo.

L'analisi delle rappresentazioni cartografiche eseguite per supportare la navigazione di cabotaggio, mostra che fino a tutto il 1600 il litorale appare caratterizzato dalla definizione di una costa molto frastagliata, sgombra da sedimenti e pertanto agevolmente navigabile da capo a capo. Anche le foci dei fiumi risultano ben evidenti, parecchio incise e libere da accumuli di sedimenti, tanto da essere a volte anche sede di porti. Le cartografie restituiscono le corrette indicazioni dei promontori, delle insenature e degli approdi, verificate anche in base all'ubicazione delle città costiere.

A partire dalla seconda metà del 1700 si evidenziano marcati e repentini cambiamenti della linea di costa, che appare interessata da un riempimento delle cale, delle insenature e dei porti, anche di quelli storicamente attivi e conosciuti. Infatti non v'è più traccia dell'importante porto

di Cetraro, ubicato nella parte bassa della valle del F. Aron con annesso attivo arsenale, evidentemente travolto e distrutto dalle colmate detritiche del fiume stesso nel 1774, che giustificherebbe la mancata segnalazione del porto nell'Atlante Geografico del Zannoni.

L'evoluzione dei cambiamenti è chiaramente riprodotta nelle successive rappresentazioni come per la cala di Amantea, presente fino al 1783 e poi completamente riempita nel 1795, dopo appena 12 anni. Tutte le rappresentazioni cartografie e le immagini di fine '700 e inizio '800 forniscono l'indicazione della tendenza più marcata della presenza di sedimenti allo sbocco dei fiumi e lungo precisi tratti costieri. Tale evidenza è rafforzata dai dati forniti dalle ricognizioni dei territori eseguiti secondo metodi cartografici via via sempre più precisi e aggiornati. Anche i fabbricati, ubicati direttamente sui primi contrafforti dei versanti, da questo periodo in poi iniziano ad essere costruiti sulla pianura costiera o sull'arenile.

La tendenza alla progradazione delle spiagge e delle colmate nonché la notevole disponibilità di sedimenti, tale da iniziare a regolarizzare il profilo di una linea di costa in precedenza estremamente frastagliata, diventa ancora più evidente dai primi decenni del 1800, con mappe ormai restituite secondo metodi geodetici. L'evoluzione continua fino a mostrare addirittura un repentino avanzamento di molti tratti di costa, che diventano strutturati tanto da iniziare ad essere utilizzati anche per la viabilità.

Il processo di progradazione della costa rimarrà in atto fino alla metà del XX secolo, ovvero fino a quando le sistemazioni idrogeologiche e forestali dei bacini montani, le opere idrauliche nei corsi d'acqua, i prelievi di sedimenti in alveo e l'urbanizzazione della costa condurranno ai noti problemi di erosione costiera in tutto il litorale.

Le variazioni della linea di costa derivanti dall'esame della cartografia prodotta, trovano concreto riscontro nei fenomeni idro-geomorfologici, nei relativi dati storici disponibili, nei cambiamenti climatici e nelle loro implicazioni sulle attività dell'uomo. Le caratteristiche morfologiche della Catena, con versanti ripidi quasi a picco sul mare, la costituzione geologica a falde di ricoprimento e le numerose fasi tettoniche, hanno causato condizioni di generale fragilità del territorio e determinato fenomeni molto spinti di tettonizzazione e alterazione dei terreni superficiali. Il cambiamento climatico della PEG, con aumento delle piogge in intensità e durata, ha conseguentemente aggravato una pregressa instabilità e accelerato i numerosi fenomeni erosivi e franosi, senza trascurare il ruolo avuto dai terremoti nei fenomeni associati.

La vicinanza della Catena alla costa e la presenza di una fitta rete di drenaggio con valli strette e profonde ha quindi consentito il trasporto del carico solido lungo le aste fluviali e il deposito del materiale alluvionale allo sbocco dell'esile piana costiera. Il deposito ha assunto quasi sempre la forma di conoidi alluvionali, alimentate da colate detritiche governate da fasi di maggiore attività franosa all'interno del bacino di alimentazione. Il risultato complessivo è stata una immediata aggradazione allo sbocco delle vallate, una marcata progradazione dei litorali sabbioso-ghiaiosi e la costruzione delle pianure alluvionali e delle fasce costiere, successivamente rimodellate dal trasporto lungo costa a seconda delle correnti marine, con direzioni non dissimili da quelle odierne.

L'incremento delle notizie sui tassi di franosità a partire dalla seconda metà del 1700 e poi per tutto il 1800 e oltre, trova una plausibile spiegazione anche nella risposta antropica al cambiamento climatico, con il diffuso disboscamento delle aree montane sia per la necessità di ampliare le superfici agricole da destinare a coltura, date le scarse rese per il clima più rigido e piovoso, sia per far legname da riscaldamento e da ricostruzione, specie dopo il terribile terremoto del 1738 che sconvolse letteralmente la Calabria. L'eccessivo sfruttamento del bosco e la scomparsa di vari lembi di copertura vegetale comportò una drastica riduzione della difesa idrogeologica, in cui i valori di erosione e dissesto sul suolo nudo assunsero valori esponenziali.

Con riferimento agli studi che ipotizzano una ciclicità dei fenomeni di progradazione e regressione in relazione alle variazioni climatiche con ciclo della durata di circa 1000 anni, occorre rimarcare che per aree settentrionali dell'Italia si è verificata una progradazione delle spiagge dopo il XVI secolo, registrata con lo sviluppo di cuspidi deltizie fluviali, con incrementi molto più marcati nel XVII secolo e trend evolutivo fino alla metà del secolo scorso (Pranzini, 1994).

Per il settore geografico considerato, sebbene i processi possano ritenersi in fase con l'ultimo ciclo climatico e sedimentologico, non possono essere considerati sincroni ma dimostrano un non trascurabile ritardo di fase di circa 200 anni. Le cause del ritardo temporale rispetto al centro-nord dell'Italia potrebbero essere ricondotte a differenze del cambiamento climatico al di sotto del 42° parallelo N, già ipotizzato per i più marcati fenomeni di desertificazione (Buonomo *et alii*, 2006) o per il significativo aumento delle precipitazioni piovose dal 1750 fino all'inizio del 1900 (Ortolani & Pagliuca, 2004). Il cambiamento climatico non sarebbe quindi avvenuto in maniera sincrona e generalizzata forse perché le particolari condizioni geografiche del Mediterraneo meridionale e delle relative correnti atmosferiche che potrebbero aver generato condizioni climatiche, soprattutto per le piogge, meno severe che in altre zone.

Infine la valutazione dei dati ha tenuto in considerazione anche il ritardo tra il verificarsi dell'evento franoso/erosivo e i tempi del trasporto solido lungo le aste fluviali, che per la loro limitata lunghezza è stimabile in poche decine di anni.

BIBLIOGRAFIA

Alessio M., Allegri l., Antonioli F., Belluomini G., Improta S., Manfra L., Preite Martinez M. (1996). *La curva di risalita del mare Tirreno negli ultimi 43 ka ricavata da datazioni su speleotemi sommersi e dati archeologici.* Mem. Descr. Carta Geol. d'It., LII, 261-276.

Antonioli F. & Ferranti L. (1996). *La risalita del mare tirreno nel corso dell'Olocene. 50 anni di ricerche.* Memorie della Società Geologica Italiana, 51, 93-99.

Antronico L., Caloiero D., Critelli S. (1991). *Valutazione al dissesto idrogeologico in Calabria provocato dalle piogge dell'inverno 1990.* Editoriale BIOS, Cosenza.

Antronico L., Greco R., Sorriso-Valvo M. (2016). *Recent alluvial fans in Calabria (southern Italy),* Journal of Maps, 12:3, 503-514.

Antronico L. & Sorriso-Valvo M (a cura di) (2010). *POR Calabria 2000-2006 Asse 1 – Risorse naturali Misura 1.4 – Sistemi insediativi Lotto 4 – Pericolosità delle conoidi alluvionali – Relazione Finale.* www.regione.calabria.it, (accesso 19/12/2020)

Antronico L., Greco R., Sorriso-Valvo M. - (2016) *Recent alluvial fans in Calabria (southern Italy)*, Journal of Maps, 12:3, 503-514).

Arnoni E. (1984). *La Calabria illustrata, Parte I, Il circondario di Catanzaro*, Cosenza, Tipografia municipale, 1874, pp. 40-42.

Biasillo R. (2020). *Dalla montagna alle aree interne. La marginalizzazione territoriale nella storia d'Italia*, in Storia e Futuro n. 52, aprile 2020, http://storiaefuturo.eu. (accesso 19/12/2020).

Buonomo V., Ortolani F. & Pagliuca S. (2006). *La distruzione delle spiagge nell'attuale periodo di transizione climatica: proposta di restauro geoambientale duraturo.* In Hydrogeo, pag. 15-29, Maggioli ed. Bologna, ISBN 9788821809194.

Conti S. (2006). *Una nota sugli Atlanti Stigliola-Cartaro*, in Polto C. (a cura di), Atti del Convegno di Studi "*La Cartografia come strumento di conoscenza e di gestione del territorio*", Messina, 29-30 marzo 2006, Dipartimento di Studi sulla Civiltà Moderna, Università degli Studi di Messina, Edizioni Dr. Antonino Sfameni, Messina, pp. 319 – 334.

Crescenti U. (2008). *Il riscaldamento globale del Pianeta Terra: riflessioni di un geologo.* In Crescenti U., Mariani L.: Cambiamenti climatici e conoscenza scientifica. 21° Secolo ed.

Dalena P. (2008). *Viabilità e porti della Calabria tirrenica tra tardo-antico e medioevo*, in *La Calabria tirrenica nell'antichità*, Rubbettino Editore, Soveria Mannelli, pp. 595-616.

Dumas A. (1842). *Viaggio in Calabria*, in Morace A. M. (a cura di), *Scrittori di Calabria*, n. 8, 2006, Rubbettino Editore, Soveria Mannelli, p. 162.

Iozzi L. (2004). *Cetraro. Un occhio sul passato che conta.* Tipografia Mazzitelli, Cetraro.

Lambeck K, Antonioli. F., Anzidei. M., Ferranti. L., Leoni. G., Scicchitano. G., Silenzi. S. (2011). *Sea level change along the Italian coast during the holocene and projections for the future*. Quaternary International, 232, 250-257.

Lena G. (2020). *Viaggio geoarcheologico attraverso la Calabria*. Rubettino ed., Soveria Mannelli, 167 pp.

Le Pera E., Sorriso-Valvo M. (2000). *Weathering, erosion and sediment composition in a high-gradient river, Calabria, Italy*. Earth Surface Processes and Landforms, Earth Surf. Process. Landforms 25, 277-292.

Mariani L. (2016). *Clima e agricoltura in Europa e nel bacino del Mediterraneo dalla fine dell'ultima glaciazione*. Rivista di storia dell'Agricoltura. a XLVI, n.2.

Marino F., Pisarra D., Tarantino S., Laino R. (2018). *Nuove ricerche e recenti ritrovamenti nell'alto cosentino*, in Mollo F. – La Torre G. (a cura di), Atti del Convegno, Tortora, 25 – 26 giugno 2016, *Il Golfo di Policastro tra Enotri e Lucani: insediamenti, assetto istituzionale, cultura materiale*, Rubbettino Editore, Soveria Mannelli, pp. 96 – 98.

Ortolani F. (2001). *Le variazioni climatiche storiche*, in Integralismo ambientale e informazione scientifica, Atti della giornata di Studio AIN 2001, Roma 2001.

Ortolani F. & Pagliuca S. (2004). *Variazione climatica, diminuzione delle risorse idriche e impatto sull'agricoltura dell'Italia meridionale*. Accademia Nazionale dei Lincei, Giornata Mondiale dell'Acqua, 21 marzo 2003. Ed. gennaio 2004, pp. 312.

Osso G., Lena G., Paoli N. (2011). *Storie di frane e di paesi scomparsi: Laghitello in Calabria*. Geologia dell'ambiente, 1-2011 pp. 44-48

Osso G., Mazzotta F., Chiappetta G., Lena G. (2018). *Lo stagno della morte: il Turbolo. Frane e malaria nel fiume Oliva (Calabria).* Geologia dell'Ambiente n. 3/2018, 15-22

Palmieri W., Petrucci O., Versace P. (2011). *La difesa del suolo nell'Ottocento nel Mezzogiorno d'Italia*, Rubettino, Soveria M.

Pepe F., & Sulli. A. (2013). *Ampiezza e tassi dei movimenti verticali a Capo Vaticano (Calabria occidentale,Italia) negli ultimi 20 mila anni determinati sulla base di cunei progradanti e piattaforme di abrasione.* Riassunti Congresso Aiqua 2013 Napoli 19-21 giugno 2013.

Pranzini E. (1994). *Bilancio sedimentario ed evoluzione storica delle spiagge*. Il Quaternario 7(1), 197-204.

Principe I. (1989). *Cartografia storica di Calabria e di Basilicata*, Edizioni Mapograf, Vibo Valentia.

Sagnotti L. (2019). *La scoperta delle variazioni climatiche a scala geologica*. https://ingvambiente.com/2019/12/10/breve-storia-sulla-scoperta-delle-variazioni-climatiche-a-scala-geologica-prima-parte-da-aristotele-a-milankovic/ (accesso 19/12/2020).

Sorriso-Valvo & M., Sylvester G. A. (1993). *The relationship beetwen geology and landforms along a coastal mountain front, Northern Calabria, Italy*. Heart Surf. Proc. and Landf. Vol. 18, 257-273.

Sorriso-Valvo M., Antronico L., Ferrini G., Gabriele S., Callegari G., Iovino F., Le Pera E., Moretti A., Petrucci O., Tansi C.,Terranova O. (1997) *Mediterranean erosion*. Fourth International Conference on Geomorphology - Italy 1997 Meeting Igu 1997 in Italy, Rende (CS), August 22-27 Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Qua!. III, T. 2 (1997), 143-150, 6 figg.

Sorriso-Valvo M., Gullà G., Antronico L., Tansi C., Amelio M. (1999). *Mass-movement, geologic structure and morphologic evolution of the Pizzotto–Greci slope (Calabria, Italy).* Geomorphology 30. 147–163.

Tripicchio V. (1984). *Sant'Angelo. Antico borgo di Cetraro*, Edito dal Centro Culturale "G. M. Ricucci", Cetraro.

Incidenze geologiche e geotecniche sulla evoluzione e/o la scomparsa di siti archeologici in area costiera e i relativi impatti dovuti alla risalita del livello del mare

Geological and geotechnical incidences on the evolution and/or disappearance of archaeological sites and the relating impacts due to sea level rise

Rosa Pagliarulo
SIGEA - APS

E-mail: rossellapagliarulo@gmail.com

Parole chiave: marker archeologici, variazioni del livello marino, falda acquifera, rischio costiero, variabilità climatica
Key words: archaeological markers, sea level changes, watertable, coastal hazard, climatic variability

1. PREMESSA

Nell'ambito di Progetti di Ricerca portati avanti negli scorsi anni dall'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI) del CNR sulla "Stabilità delle aree costiere in relazione ai processi geodinamici e ai cambiamenti climatici", sulla "Evoluzione delle aree costiere e analisi dei fattori che ne determinano le dinamiche" e lo "Studio sugli indicatori geologici delle variazioni climatiche dal Pleistocene all'Olocene" sono stati studiati alcuni siti archeologici che rivestivano particolare importanza in relazione ai fenomeni in essere. In questa nota verranno esaminati due *case histories*: la descrizione degli eventi occorsi nella cripta della Basilica di San Nicola di Bari e l'evoluzione della costa dell'antico sito di Egnathia con le vicissitudini del porto.

Negli ultimi anni, per diversi siti localizzati lungo le coste italiane sono state definite curve relative di Risalita del Livello del Mare (RLM) sulla base di dati ottenuti da markers geomorfologici, speleotemi, beach rocks, solchi di battente, margini di terrazzi e da carotaggi.(Antonioli *et al*., 2007; Lambeck *et al*.,2004 a; 2010)

I siti archeologici in cui sono presenti i resti di antichi insediamenti marittimi, oggi sommersi o emersi come i porti, le cisterne e le vasche, costituiscono un importante indicatore per i diversi livelli di stazionamento del mare. (Ferranti *et al*., 2006) Le strutture dalla cronologia archeologica nota possono essere considerate come veri e propri capisaldi archeo geodetici.

I modelli matematici che ricostruiscono le variazioni del livello del mare a scala continentale o regionale dipendono principalmente dalle variazioni glacio-idro-isostatiche, dalla tettonica, quindi i movimenti negativi e positivi delle terre emerse, dalle variazioni nella forza di gravità e negli ultimi secoli, da cause antropiche, (Peltier, 2004). Per quanto riguarda la scala locale, le variazioni possono essere di breve periodo (giornaliero, mensile, annuale) prevalentemente correlate a cause meteomarine e meteorologiche (maree, venti predominanti, variazioni di pressione atmosferica).

La risposta isostatica risultante dalla modellazione matematica richiede parametri reologici che provengono da livelli marini di aree ritenute tettonicamente stabili, (Ferranti *et al*., 2006)

Le misure delle variazioni del mare si basano, soprattutto nel Mar Mediterraneo, sui livelli datati provenienti dai siti archeologici costieri risalenti agli ultimi 3000 anni, mentre mancano informazioni per il periodo Medievale.

Per quanto concerne la costa adriatica pugliese, laddove sono localizzati i due siti presi in esame, (Fig. 1) dall'Ultimo Massimo Glaciale (LGM 22 ± 2 ky cal BP) il livello del mare è risalito di più di 120 m fino a circa 7000 anni BP con un tasso di circa 10 mm/yr, poi più lentamente da 7000 anni fa fino a circa 2000 anni BP fino all'inizio del XIX secolo da quando è iniziata l'attuale risalita. Anche il sollevamento della piattaforma carbonatica pugliese (circa 120 m) è iniziato durante il Pleistocene Medio. Questa intensa fase tettonica si è esaurita intorno al MIS (Marine Isotopic Stage) 9.3 (330 Kyr) sostituita da una fase di sostanziale stabilità fino al Pleistocene Superiore- Olocene. Attualmente l'area è considerata stabile con un minimo tasso di sollevamento di circa 0.01÷ 0.10 mm/yr. (Lambeck *et al*., 2004 b; 2011)è

Figura 1. Localizzazione dei siti presi in esame.

FIGURA 2. La Basilica di San Nicola. All'epoca della costruzione la chiesa si trovava molto più vicina al mare rispetto agli attuali 90 m. Il mare arrivava a lambire quella che localmente viene denominate La Muraglia e l'accesso dal mare era diretto.

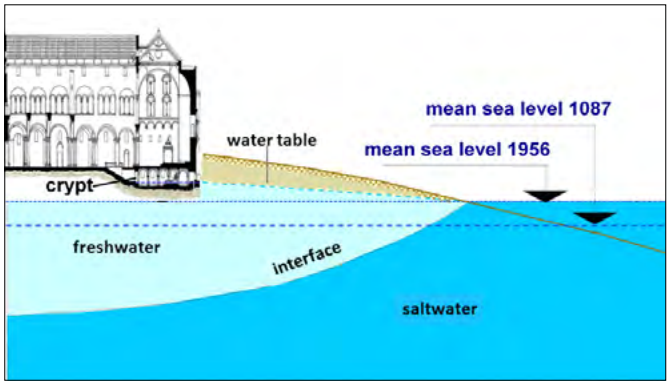


FIGURA 3. Schema (non in scala) che mostra l'effetto della risalita del livello marino sulla falda. All'epoca della costruzione il pavimento della cripta era al di sopra della superficie di falda, mentre come conseguenza delle oscillazioni positive del livello mare, ripetutamente nei secoli si sono verificati estesi allagamenti tanto da avere la necessità di sollevare progressivamente il pavimento. La relazione tra il del mare e falda è regolato dal principio di Ghyben-Herzberg.

2. LA BASILICA DI SAN NICOLA A BARI

Come accennato in premessa le osservazioni sulle variazioni del livello del mare includono le datazioni certe di strutture archeologiche le cui localizzazioni erano direttamente correlate al livello del mare.

Queste considerazioni sono soprattutto valide per le coste del Mar Mediterraneo che negli ultimi 3 ky sono state sede di numerosissimi insediamenti. I siti archeologici, localizzati in prossimità o lungo le coste costituiscono dei markers del tutto particolari perché permettono una più precisa correlazione cronologica degli eventi e quindi rivestono un ruolo fondamentale ai fini dello studio sulla dinamica costiera.

Ma nonostante la presenza di una grande quantità di resti archeologici solo pochi siti possono essere utilizzati per la determinazione precisa dei livelli del mare riferiti successivamente al period Romano e a quello Medievale.

L'imponente costruzione della Basilica di San Nicola,(Fig. 2) localizzata al bordo di una piccola penisola della costa Adriatica, nel borgo antico della città di Bari, è stata realizzata tra il 1087 e il 1197 per ospitare i resti del Santo, tuttora conservati nella cripta. Nella cripta, in conseguenza dell'invasione dell'acqua di falda, idraulicamente connessa al livello del mare, i vari piani di calpestio venivano ripetutamente riposizionati, ma ciò nonostante rimase inaccessibile per tutto il primo cinquantennio del secolo scorso. (Cotecchia, 1981; Cotecchia *et al.*,1983) (Fig. 3).

Gli obiettivi di questo studio sono stati: i) dare un contributo alla ricostruzione del livello marino negli ultimi 1000 anni; ii) analizzare la possibilità di riferirsi ad un marker diverso da quelli adottati generalmente; iii) verificare se la metodologia utilizzata è valida ai fini della calibrazione e alla taratura della curva di riferimento; iv) correlare i livelli di calpestio della cripta con la curva RSL di riferimento (Pagliarulo *et al.*, 2013 a; 2013 b).

L'area, che ricade nell'Avampaese Appulo, è ritenuta tettonicamente stabile con l'assenza di significativi movimenti crostali verticali, per cui i dati osservati possono essere riconducibili soltanto ad una continua risalita del livello del mare. In affioramento sono presenti calcari, calcari dolomitici e dolomie appartenenti alla formazione dei Calcari di Bari (Albiano Sup.- Cenomaniano) Su di essi in lembi residui e in parte del tutto erosi poggiano le calcareniti Plio- Pleistoceniche, (Gioia *et al.*, 2011; Pieri *et al.*, 2011). Il sistema idrogeologico afferente alla città di Bari fa parte di quello più ampio carsico e costiero delle Murge. La possente struttura carbonatica fratturata e carsificata ospita la falda di alimentazione murgiana. In prossimità della città di Bari

la morfologia della superficie di falda riflette un singolare assetto idrodinamico che si estrinseca in un complesso rapporto con l'acqua di mare. La falda carsica nella fascia costiera viene sostenuta dall'acqua di mare di invasione continentale attraverso una superficie di contatto la cui giacitura è funzione in ogni punto della differenza di densità tra i due tipi di acqua. La falda è in connessione idraulica con il livello del mare, la gui relazione è stabilita dal principio di Ghyben-Herzberg, per cui l'equilibrio tra acque sotterranee e la condizione a contorno del carico idraulico è il livello del mare e quindi ogni significativo stazionamento o spostamento del livello del mare modifica l'assetto idrogeologico.

La superficie di falda segue da vicino i movimenti del mare, come pure le oscillazioni di marea con variazioni di ampiezza di fase che dipendono dalla distanza dalla linea di costa. L'escursione massima media annuale della falda cittadina misurata a circa 2 Km dal mare è di circa 60 cm dopo 7-8 ore. (Spilotro & Leandro, 2010) La presenza della falda idrica a pelo libero molto superficiale ha interessato le fondazioni ed i piani interrati di molti edifici nella città di Bari (Cotecchia, 2010).

Le vicissitudini dell'ipogeo sono stati ricostruiti da una relazione dettagliata fatta da Schettini (1957) a seguito dei lavori di impermeabilizzazione realizzati nel 1956 (Fig 4).

Il pavimento originale a mosaico, a causa delle prime infiltrazioni d'acqua nel 1543 fu sollevato di 6 cm, ma non essendo risolto il problema nel 1599 fu sollevato di altri 8 cm. Nel 1800 fu definitivamente sollevato di 40 cm e qualche anno dopo la cripta fu chiusa al culto per quasi 2 secoli perché impraticabile. I lavori di impermeabilizzazione del 1956 hanno consentito di eliminare i vari livelli prodottisi nel tempo e scoprire la base delle colonne, riportando il piano di calpestio a quello del 1543 e scoprire anche i mosaici del primo pavimento.

Con i lavori del 1956 furono impermeabilizzate le pareti della cripta per evitare le infiltrazioni e, per annullare quelle prodotte dalla falda, furono fatti interventi nel sottosuolo con iniezioni di miscela acqua- cemento-bentonite e pozzolana macinata. (Schettini, 1957) Durante questi lavori furono rimosse anche le decorazioni barocche delle 28 colonne con capitelli tutti diversi, ripristinando l'equilibrio volumetrico (Fig.4).

Sulla base di tutte le osservazioni e misure effettuate, si può asserire che i dati archeologici sono un buon indicatore per stimare i livelli del mare dal 1087 in quanto l'area è tettonicamente stabile. La differenza di ~24 cm del pavimento del 1087 rispetto alla curva di risalita di riferimento può essere spiegato con il fatto che esso sia stato posizionato almeno a 25 cm dal livello massimo piezometrico dell'epoca in modo da tenere la cripta asciutta. Un simile trend è stato indicato anche per alcuni siti costieri israeliani, in cui si ipotizza un ritiro del mare nel periodo 1000-1300 in coincidenza con Medieval Warm Period (MWP) (950-1250 AD), (Toker *et al.*, 2012). Il marker utilizzato, sia pure indiretto, è risultato abbastanza attendibile, per la localizzazione della Basilica vicinissima alla linea di riva.

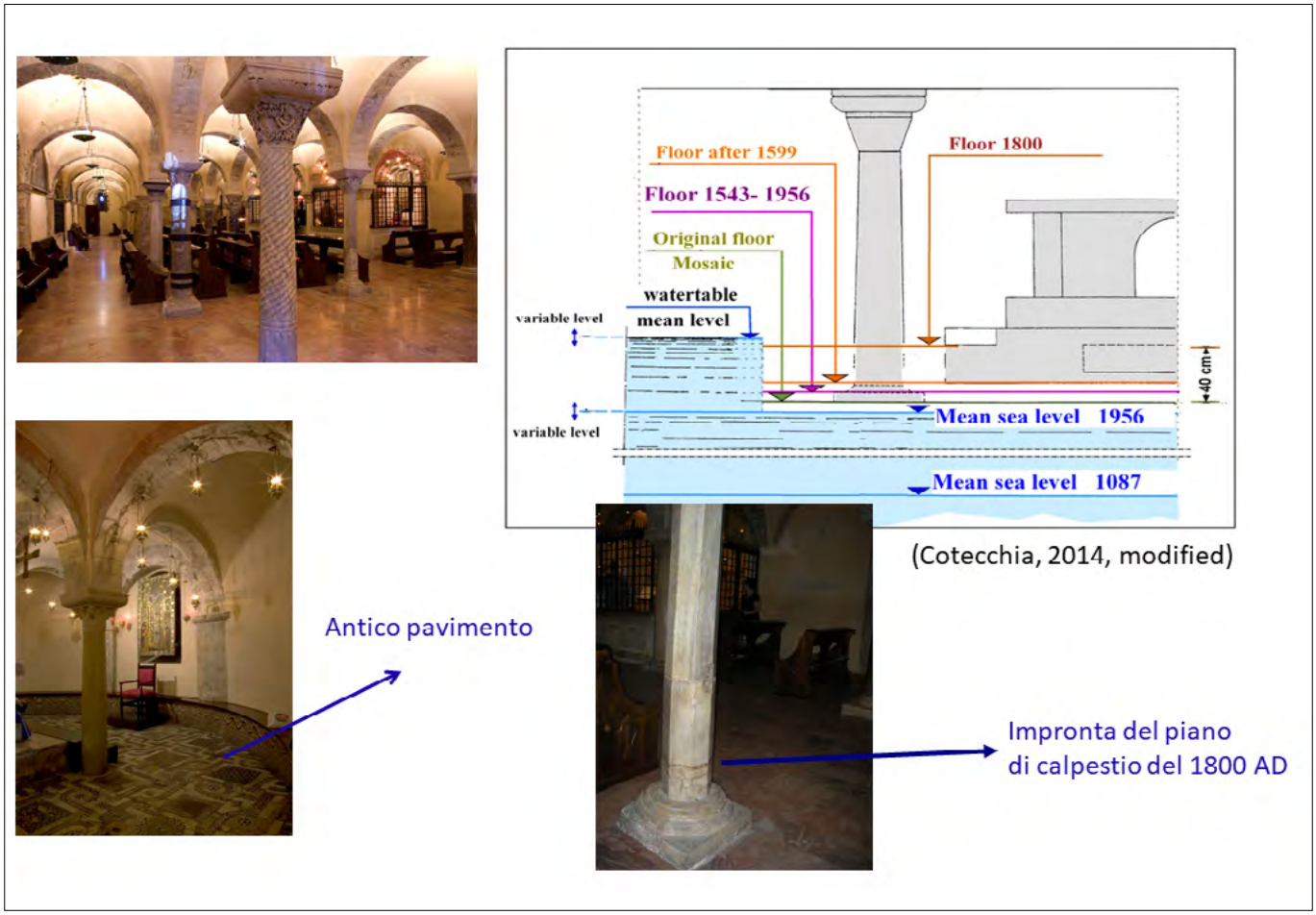


Figura 4. L'attuale aspetto della cripta con il pavimento a mosaico del 1087; la sezione evidenzia il riposizionamento delle diverse pavimentazioni nel corso degli anni a causa dell'invasione dell'acqua di falda.; l'impronta del piano di calpestio del 1800 AD su una Colonna.

3. IL SITO ARCHEOLOGICO DI EGNATHIA

Questo sito archeologico è stato oggetto di studio durante le ricerche sui markers di paleo livelli del mare con la finalità di definirne l'evoluzione geomorfologica costiera e acquisire dati utili per il modello di Lambeck che ricostruisce le variazioni del livello mare per il Tardo Pleistocene e l'Olocene ed i relativi movimenti verticali. (Milella *et al*., 2007). Successivamente l'attenzione è stata focalizzata sulle vicissitudini dell'antico porto. (Cherubini *et al*., 2008; Pagliarulo & Gentile, 2011) La storia di Egnathia, (antica Gnathia) si è snodata nell'arco di molti secoli. L'antica città, citata da autori come Plinio, Strabone, Orazio, ebbe grande importanza nel mondo antico per la sua posizione geografica,(Pepe, 1882). Da una parte col suo porto si trovava al centro di traffici marittimi del Mediterraneo, dall'altra sin dai tempi più remoti collegata verso l'interno trovandosi lungo il percorso della via Traiana. (Schmiedt, 1975), (Fig. 6). I primi insediamenti risalgono all'Età del

Floor replacement (year)	Pavement elevation (cm)	Estimated water table elevation (cm)	Δ pred. sl - pv elevation (cm)
1087	-31.8	- 6.8	24.2
1543	-25.8	- 0.8	0
1600	-17.8	7.2	6.2
1800	8.2	33.2	3.8
1956	25.8	0.8	21.8

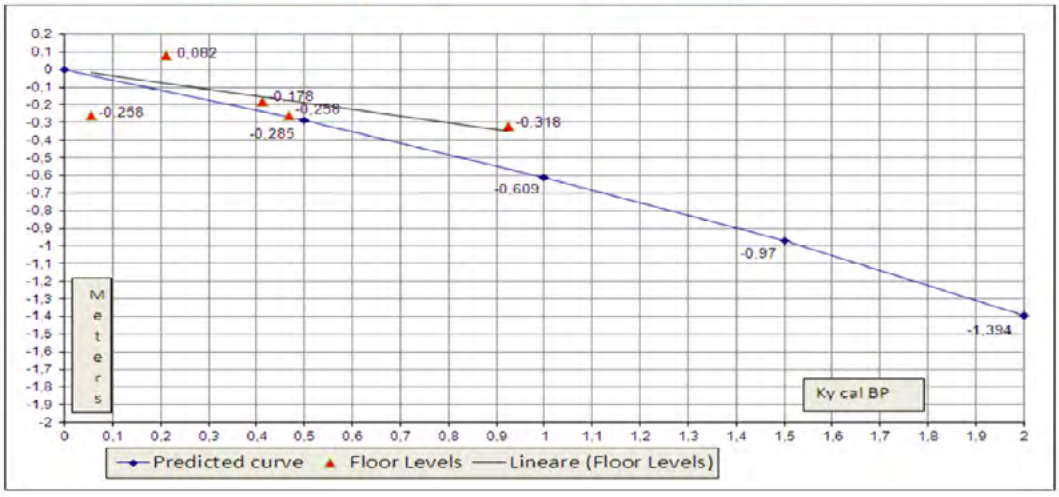


FIGURA 5. Valori ottenuti dal rilievo topografico con le quote dei diversi piani di calpestio rispetto al livello medio marino di riferimento e i livelli di falda relativi tra il 1087 e il 1956. Confronto tra la RLM di riferimento per il Mare Adriatico meridionale (Lambeck *et al*., 2010) e le quote dei vari pavimenti rilevati nella cripta della Basilica di San Nicola (triangoli).

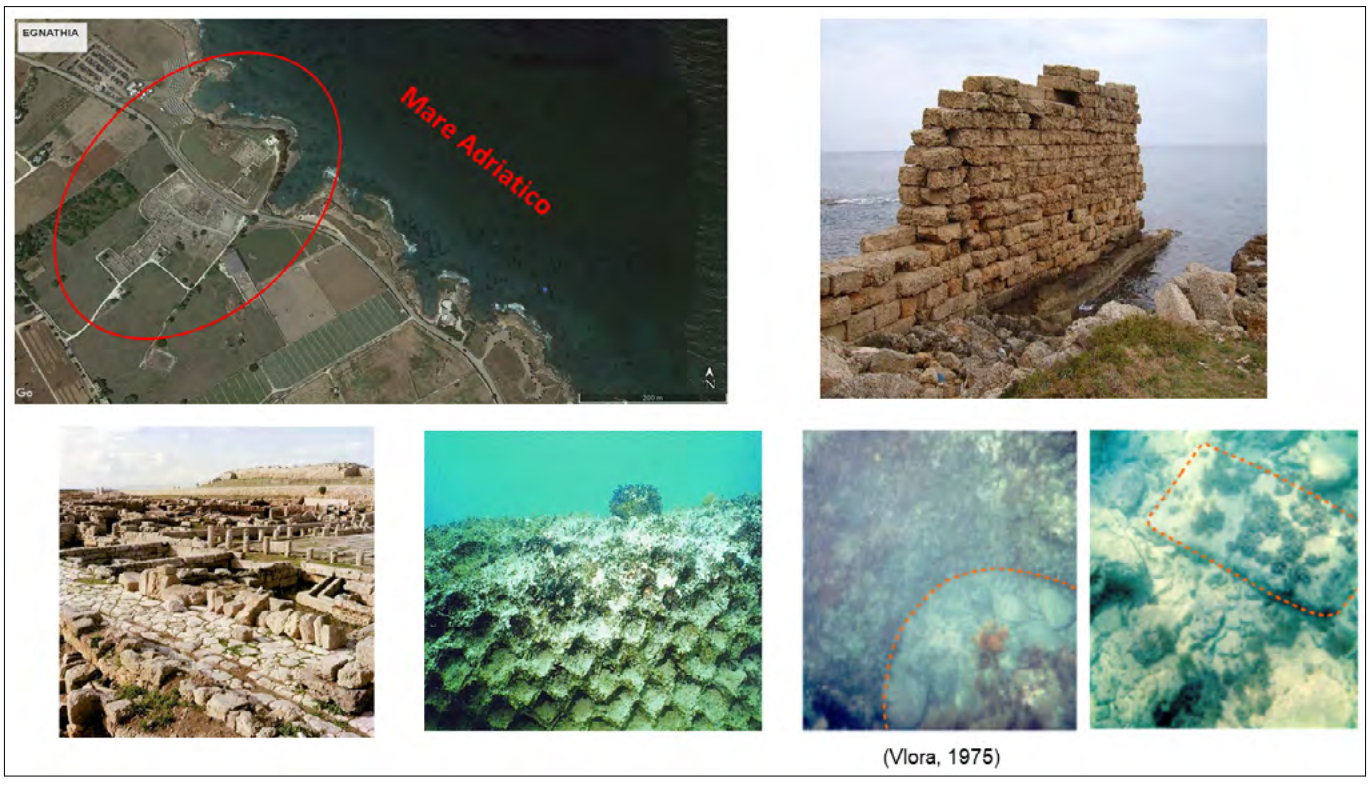


FIGURA 6. L'area degli scavi archeologici di Egnathia; L'estremp tratto settentrionale delle poderose mura di difesa, proteso nel mare, il cosiddetto Muraglione; La via Traiana,il Foro e le fortificazioni dell'Acropoli; Tratto del molo sommerso del Porto Romano, cisterna e tomba.

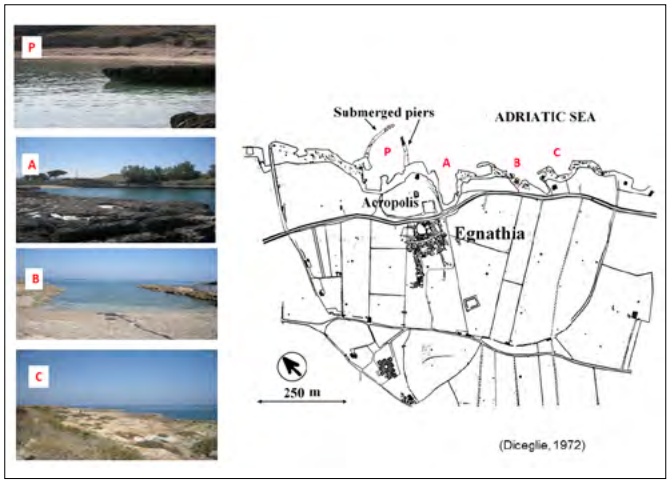


Figura 7. Gli antichi approdi.). L'insenatura più profonda e vasta, a Sud-Est (C) sede del più antico insediamento, ebbe la funzione di porto della Egnazia messapica, senza opere protettive e compatibile con l'ancoraggio alle imbarcazioni di un piccolo centro quale l' Egnazia dell'epoca. Schmiedt (1975) pose la sua attenzione sulle cale maggiori, (B) e (A) le cui sponde risultano rettificate e conservano tracce di rientranze artificiali riscontrate in alcuni porti greci. In seguito, nel II e I secolo a.C., con il consolidarsi del dominio Romano, il centro messapico iniziò ad ingrandirsi per cui l'antico ancoraggio iniziò a non essere più sufficiente. L'andamento della linea di costa era variata e quindi fu realizzato un porto esterno nell'insenatura a NW dell'acropoli (P).

Bronzo (XV secolo a. C.). La fase Messapica risale al VIII secolo a. C, periodo in cui la città raggiunge il massimo splendore. Nel III secolo a.C con l'occupazione Romana la città entra a fare parte della Repubblica come Municipium, nel 545 d. C. fu saccheggiata dai Goti e inizia il declino del sito. Dopo le ripetute incursioni dei Saraceni, la popolazione si rifugia nell'entroterra e lungo la costa a Nord e dal XV secolo d. C. l'abbandono di Egnathia diventa lento e progressivo. (Donvito, 1988; Di Ceglie, 1981) Dal XIX secolo, la località viene usata esclusivamente come cava di materiale edilizio di reimpiego per le costruzioni di Fasano e Monopoli e depredata di cimeli e tombe.

Il paesaggio è caratterizzato da una sequenza di superfici suborizzontali inclinate leggermente verso il mare, costituite da Calcareniti e Calciruditi Plio-Pleistoceniche, formatesi per abrasione marina a seguito delle fasi di sollevamento tettonico regionali e dei diversi livelli di stazionamento del mare sin dal Pleistocene medio. Il territorio è solcato da incisioni e valli, localmente denominate "lame", generalmente parallele tra loro e perpendicolari alla costa. Lungo queste valli che costituiscono una rete di drenaggio relitto scarsamente gerarchizzata, si incanalavano copiosi sedimenti trasportati durante i periodi piovosi (Mastronuzzi & Sansò, 2000). Il litorale, quindi, risulta inciso e articolato in piccole baie e calette in corrispondenza dei punti di sbocco delle lame.

La costa è estremamente suscettibile all'erosione. (Delle Rose *et al*., 2002). All'azione distruttrice del mare si è aggiunta l'azione dell'uomo che da tempi remoti ha cavato le rocce calcarenitiche costiere. I tagli operati dall'uomo sono stati ulteriormente elaborati da parte del moto ondoso e talvolta non è possibile riconoscere i tratti costieri originari.

Di Ceglie (1972) osserva che tutta la costa offriva 4 ancoraggi. (Fig. 7). Notizie di un porto in funzione ci giungono da Strabone (60 a. C.- 180 d.C.) e negli stessi anni da Orazio. (Fig. 8). I rilievi effettuati sulle strutture sommerse riferibili al porto Romano (Auriemma & Solinas, 2009) permettono di ipotizzare livelli del mare compatibili con le datazioni dei resti archeologici e i tassi del sollevamento isostatico. Questa circostanza viene confermata anche dalla

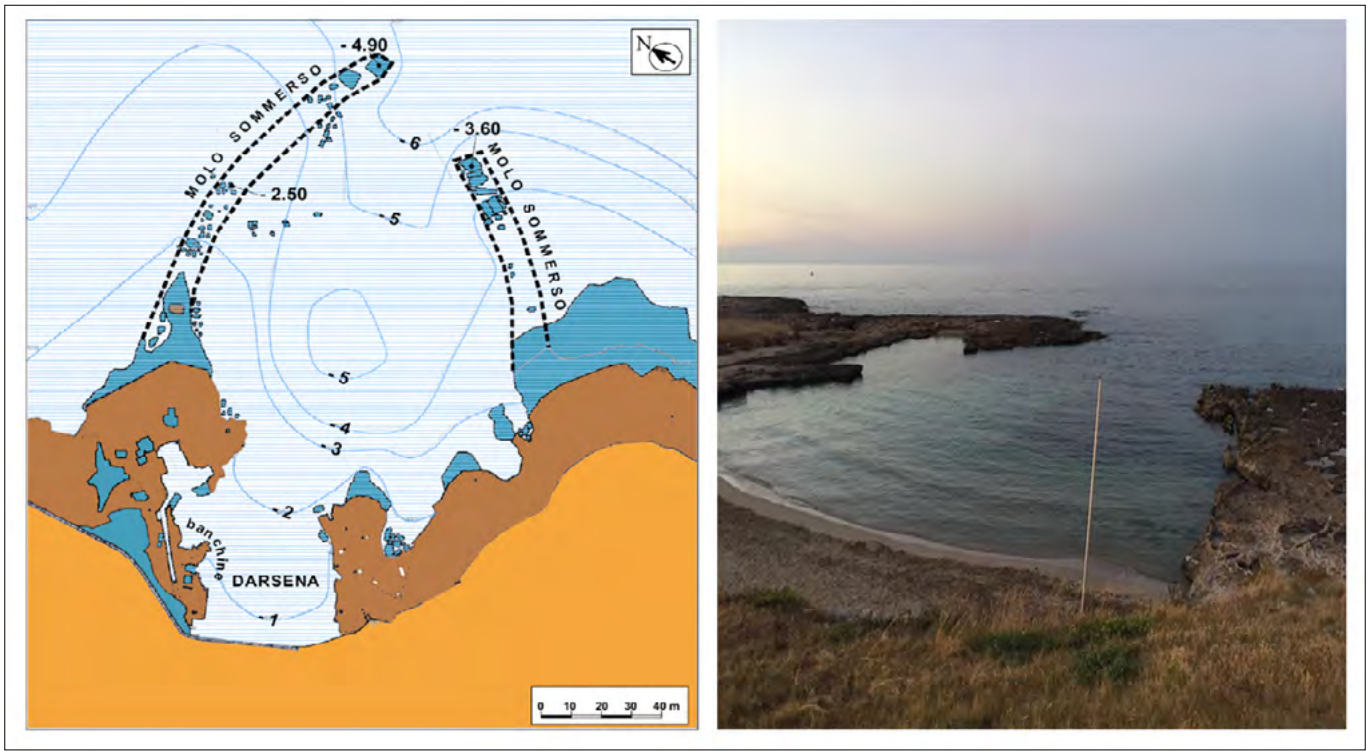


Figura 8. Il porto sommerso (I secolo a. C. ÷ I secolo d. C.) e l'aspetto attuale dell'insenatura che lo ospita. Per quanto riguarda le strutture sommerse si ricorda Strabone che per primo dà indicazioni relative al suo porto, e Tolomeo (138- 180 d.C.) che lo considerava sulla rotta del cabotaggio adriatico, oltre che lungo la via Traiana con i porti di Bari e Brindisi. Si è avanzata l'ipotesi che quello di Egnazia fosse il porto della Peucezia, e quindi secondo questi antichi autori avrebbe avuto la funzione di scalo, tappa e porto di rifugio.

presenza di "catenae" nella parte superiore del molo sommerso (Vlora, 1975).

Una parte consistente dello studio su questo sito è quella relativa alla correlazione dei risultati del modello matematico con l'evoluzione del clima, tenendo conto che il moto ondoso suscitato dal vento risulta essere in stretta dipendenza dalle condizioni climatiche, (Cherubini *et al*., 2008; Pagliarulo & Gentile, 2011; Pagliarulo, 2013). La storia del clima ed il susseguirsi di periodi piovosi, nei quali copiosi sedimenti giungono alla linea di battigia e si muovono lungo di essa, e periodi aridi durante i quali i sedimenti vengono erosi potrebbe essere alla base di alcune scelte urbanistiche degli abitanti dell'antica città di Egnazia (Lattanzi, 1974).

È stato utilizzato un originale modello di calcolo al tratto costiero prospiciente il sito archeologico. Il modello è basato sul calcolo delle energie del moto ondoso disponibili e tali da condizionare il trasporto dei sedimenti.

Considerando che il principale agente di trasformazione del litorale è il moto ondoso da vento, il programma utilizzato (Perfect Storm) consente di individuare, partendo proprio dai dati del vento, le mareggiate che hanno investito la costa di Egnathia e di seguire il complesso fenomeno del trasferimento di energia che dal vento si accumula nelle onde e, successivamente, di determinare le caratteristiche del moto ondoso sviluppato da ciascuna delle mareggiate individuate nell'intervallo di tempo compreso tra il 1951-2000. Il programma permette, in successive fasi, di determinare l'energia che le onde frangenti, di ciascuna delle mareggiate individuate, applica al litorale schematizzato in tratti rettilinei e di stilare bilanci energetici pluriennali e/o complessivi che si esplicita con i valori dei flussi di energia risultante (f.e.r.). L'analisi dei risultati del programma evidenzia che l'energia complessiva applicata dal moto ondoso al litorale di Egnazia é diretta verso sud come pure la direzione del trasporto dei sedimenti. (Fig. 9). Dallo studio di dettaglio è stata ricostruita l'evoluzione geomorfologica del tratto costiero e le vicissitudini dell'antico porto della città.

In definitiva, se si mettono in relazione i risultati ottenuti dal modello matematico con lo stato dei luoghi, laddove sono presenti spiagge residuali in corrispondenza delle piccole incisioni costiere, si evidenzia che la fase attualmente attraversata dal litorale lungo il quale si estendono i resti di Egnathia è di erosione. La fase erosiva determina una sensibile diminuzione dei sedimenti presenti lungo costa e, di conseguenza, è associata ad una maggiore visibilità dei reperti archeologici sommersi che vengono privati della coltre di sedimenti sovrastante. Tenendo conto che il moto ondoso suscitato dal vento risulta essere in stretta

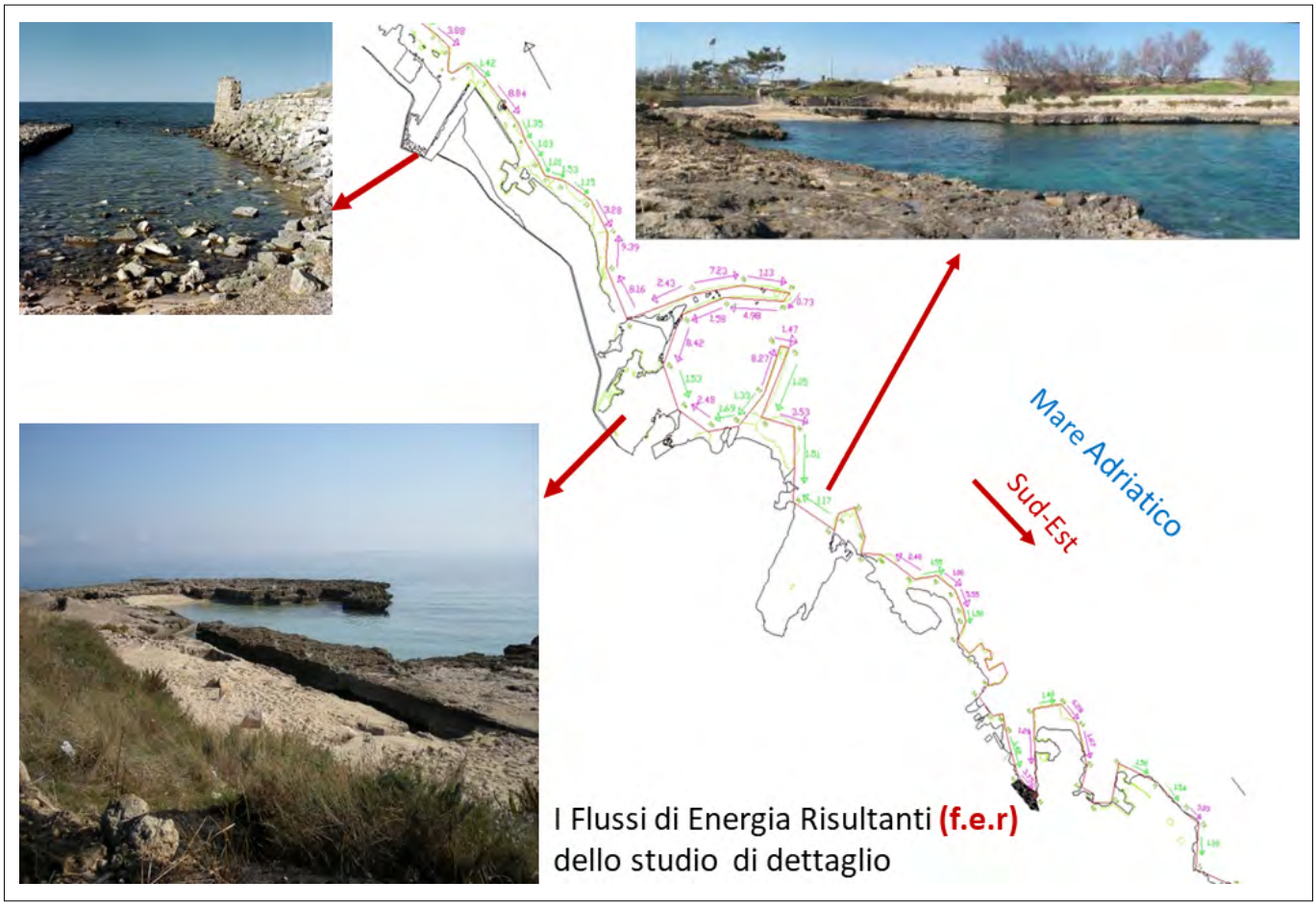


Figura 9. L'analisi dei risultati del programma evidenzia che l'energia complessiva applicata dal moto ondoso al litorale di Egnazia é diretta verso sud come pure la direzione del trasporto dei sedimenti. Si può riassumere che i sedimenti movimentati lungo la costa tenderebbero a colmare le cale attualmente incise nel litorale e a formare pocket beaches, mentre lungo la linea di costa prevale l'erosione da parte del moto ondoso. La fase erosiva determina una sensibile diminuzione dei sedimenti presenti lungo la linea di riva, dovuta anche ad un minor apporto di materiale veicolato dalle lame dall'interno a causa alla fase attuale di clima caldo con scarsa piovosità. La conseguenza di ciò è una maggiore visibilità dei reperti archeologici sommersi man mano privati della coltre di sedimenti sovrastante.

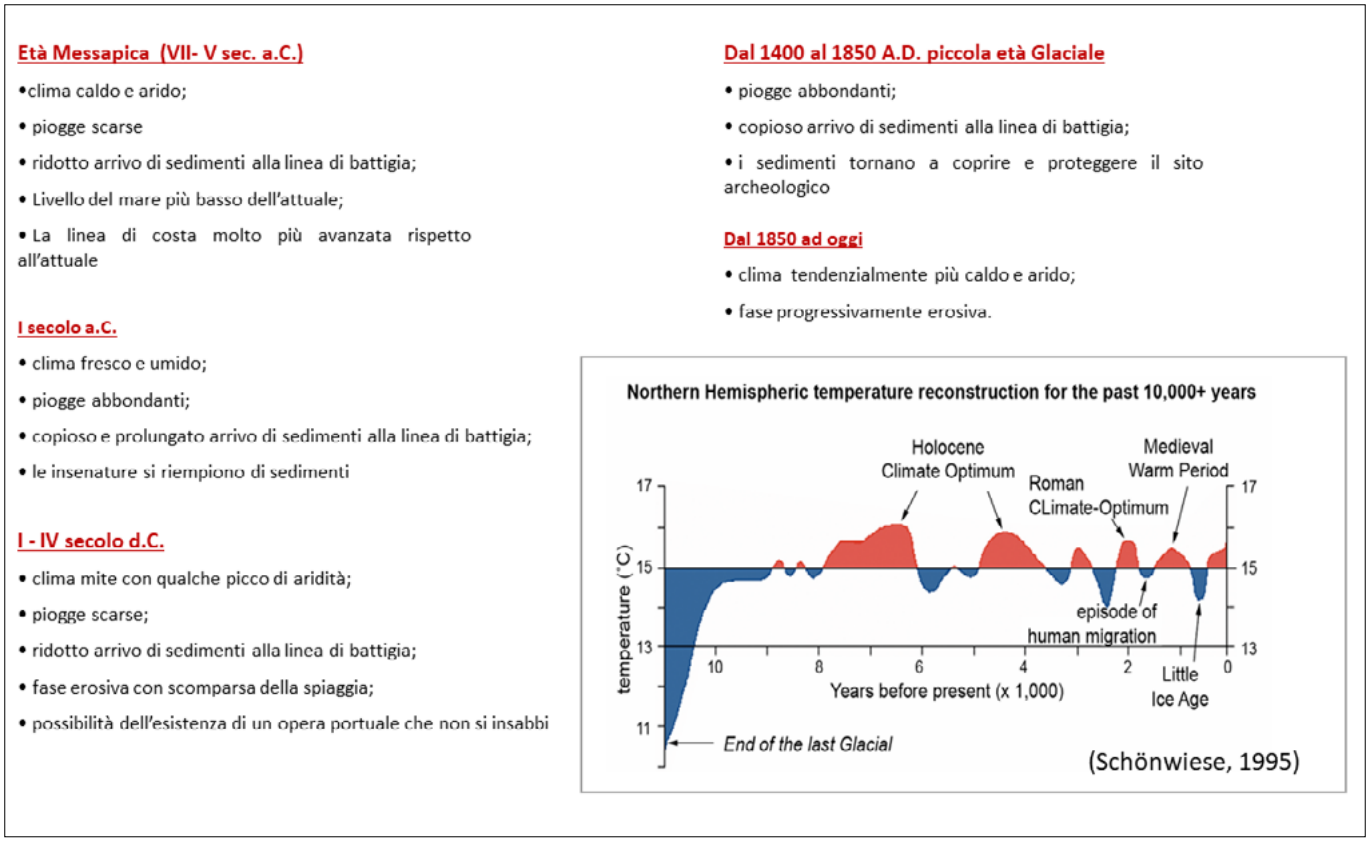


Figura 10. L'evoluzione geomorfologica della costa in epoca storica in correlazione alla curva della variabilità climatica.

dipendenza dalle condizioni climatiche ne consegue che anche l'entità dei sedimenti trasportati è in relazione alle condizioni climatiche. La storia del clima con l'alternarsi di periodi piovosi, nei quali copiosi sedimenti giungono alla linea di battigia, si muovono lungo essa e si accumulano nelle cale, e periodi aridi durante i quali i sedimenti appena depositati vengono smantellati è causa del modellamento e dell'evoluzione della costa. (Fig. 10). Quindi, in periodo messapico il livello del mare era più basso dell'attuale e la linea di costa molto più avanzata rispetto a quella odierna. Il chè potrebbe spiegare anche la presenza di tombe risalenti a quel periodo ora sommerse. Nel I-IV secolo d,C, cambiano le condizioni climatiche, il clima si fa più mite, la fase erosiva determina la scomparsa della spiaggia e le opere portuali vengono edificate su uno spesso strato di ciottoli e sedimenti grossolani. Successivamente con i continui cambi nella quantità di materiali depositati le vestigia sommerse tornano ad essere ricoperte dalla coltre sei sedimenti. (Fig. 11)

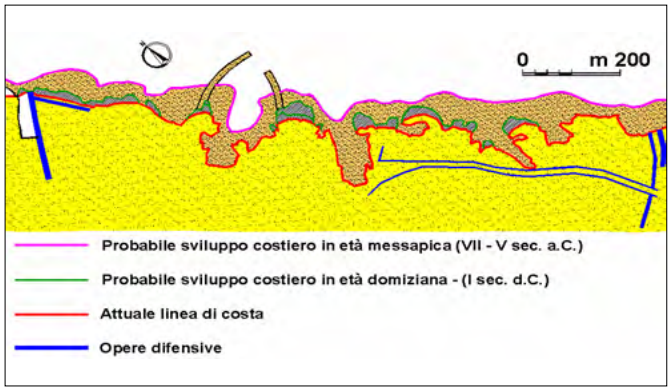


Figura 11. Andamento della liea di costa nelle diverse età di Egnathia.

4. CONCLUSIONI

Le metodologie di studio adottate per i due siti descritti costituiscono un contributo di base per approfondire le conoscenze delle fenomenologie che il cambiamenento climatico in atto, principalmente connesso all'alterazione degli equilibri naturali da parte delle attività antropiche, imprime sul territorio accelerandone i processi evolutivi. Ciò è particolarmente evidente in ambiente costiero, in quanto l'incremento del livello marino, l'erosione e la maggiore frequenza degli eventi estremi sono causa di notevoli danni, sia in termini economici, che di qualità della vita nelle città costiere. Facendo proprie, quindi le problematiche geologiche che hanno coinvolto le comunità del passato è possibile prevedere soluzioni progettuali ai fini di una prevenzione e minimizzazione degli impatti sulle attività produttive, sui beni e sul paesaggio.

BIBLIOGRAFIA

Antonioli F., Anzidei M., Lambeck K., Auriemma R., Gaddi D., Furlani S., Orrù P., Solinas E., Gaspari A., Karinja S., Kovačić V., Surace L. (2007). *Sea level change during Holocene from Sardinia and northeastern Adriatic (Central Mediterranean sea) from archaeological and geomorphological data*. Quaternary Science Reviews 26, 2463-2486.

Auriemma R., Solinas E. (2009). *Archaeological remains as sea level change markers: a review*. Quaternary International 206, 134- 146.

Cherubini C., Gentile G.M. Pagliarulo R. (2008). *I sedimenti nella evoluzione storica del tratto costiero prospiciente il sito archeologico di Egnazia*. Geologi e Territorio. Periodico di Scienze della Terra 3/ 4, 193-200.

Cotecchia V. (1981). *Methodologies Adopted and Results Achieved in the Investigation of Sea Water Intrusion into the Aquifer of Apulia*. Geologische Jahrbuch C29, Hannover. 1- 68.

Cotecchia V. (2010). *L'ingegneria geotecnica nell'uso corretto del sottosuolo urbano della città di Bari: il caso del parcheggio interrato e in falda di P.za C. Battisti*. Ass. Regionale Ingegneri e Architetti di Puglia, 1- 105.

Cotecchia V. (2014). *Le acque sotterranee e l'intrusione marina in Puglia: dalla ricerca all'emergenza nella salvaguardia della risorsa*. Mem. Descr. Carta Geol. D'It., 92: Parte I, pp 549; Parte II, pp 688.

Cotecchia V., Tadolini T., Tulipano L. (1983). *Sea water intrusion in the planning of groundwater resources protection and utilization in the Apulia region (Southern Italy)*. Geologia Applicata e Idrogeologia 18 (II), 367-382.

Delle Rose M. Pagliarulo R. Parise M. (2002). *Some insight for the evolution of the Adriatic coastline, as inferred from research at the archaeological site of Gnathia (Apulia, Southern Italy)*. GI^{2}S Coast, Research Pub. 1, 69-72.

Di Ceglie S. (1972). *Il porto di Egnazia*. Fasano.

Di Ceglie S. (1981). *Gnathia - Forme della città delineata mediante la prospezione archeologica con 5 Tavole allegate*. Laboratorio Centro Aerofotografico, Università di Bari.

Donvito A. (1988). *Egnazia - Dalle origini alla riscoperta archeologica*. Schena ed., Fasano (Br), pp.176

Ferranti L., Antonioli F., Mauz B., Amorosi A., Dai Pra G., Mastronuzzi G., Monaco C., Orrù P., Pappalardo M., Radtke U., Renda P., Romano P., Sansò, P., Verrubbi V. (2006). *Markers of the last interglacial sea-level highstand along the coast of Italy: tectonic implications*. Quaternary International 145-146, 30- 54.

Gioia D., Sabato L., Spalluto L., Tropeano M. (2011). *Fluvial landforms in relation to the geological setting in the "Murge Basse" karst of Apulia (Bari Metropolitan area, Southen Italy)*. Journal of Maps, 148- 155. doi:10.4113/jom.2011.1136.

Lambeck K., Antonioli F., Purcell A., Silenzi S. (2004 a). *Sea–level change along the Italian coast for the past 10,000 yr*. Quaternary Science Reviews 23, pp. 1567-1598.

Lambeck K., Anzidei M., Antonioli F., Benini A., Esposito E. (2004 b). *Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for modern sea level rise*. Earth and Planetary Science Letters 224, 563-575.

Lambeck K., Woodroffe C.D., Antonioli F., Anzidei M., Gehrels W.R., Laborel J., Wright A.J. (2010). *Paleoenvironmental Records, Geophysical modeling, and reconstruction of sea-level trends and variability on centennial and Longer Timescales*. In:Woodworth, Philip L., Aarup, Thorkild, Wilson,W. Stanley (Eds.), *Understanding Sea Level Rise and Variability*. Blackwell Publishing, 61-121.

Lambeck, K., Antonioli, F., Anzidei, M., Ferranti, L., Leoni, G., Scicchitano, G., Silenzi, S. (2011). *Sea level change along the Italian coast during the Holocene and projections for the future*, Quaternary International, 1- 8.

Lattanzi E. (1974). *Problemi topografici ed urbanistici dell'antica Gnathia*. Cenacolo, IV, 9-21.

Mastronuzzi G., Sansò P. (2002). *Pleistocene sea-level changes, sapping processes and development of valley networks in the Apulia region (southern Italy)*. Geomorphology, 46 , 19-34.

Milella M., Pignatelli C.. Donnaloia M., Mastronuzzi G. (2007). *Sea level during 4th- 2 nd century B.P. in Egnazia (Italy) from archaeological and hydrogeological data*. Il Quaternario, 19 (2), 251- 258.

Pagliarulo R., Antonioli F., Anzidei M. (2013 a). *Sea level changes since the Middle Ages along the coast of the Adriatic Sea: The case of St. Nicholas Basilica, Bari, Southern Italy*, Quaternary International 288, 139-145.

Pagliarulo R., Antonioli F., Anzidei M. (2013 b). *Reply to comment by C. Morhange, G. Bony, C. Flaux & M. Shah-Hosseini on "Sea level changes since the Middle Ages along the coast of the Adriatic Sea: The case of St. Nicholas Basilica, Bari, Southern Italy"*, Quaternary International 303, 230-323.

Pagliarulo R., Gentile G.M. (2011). *The application of a mathematical Model to the coastal evolution at the archaeological site of Egnathia (Apulia, Southern Italy)*. Marine Research at CNR . Vol. DTA 6, 1209-1218.

Pagliarulo R. (2013). *Applicazione di un modello matematico nella ricostruzione dell'evoluzione geomorfologica di tratti costieri*. In: *Le tecnologie del CNR per il mare*, Omgrafica Roma, 92.

Pepe L. (1882). *Notizie Storiche ed Archeologiche dell'antica Gnathia Tip Tamborrino*. Ostuni pp.170.

Peltier W.R. (2004). *Global Glacial Isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G(VM2) model and GRACE*. Annual Reviews. Earth and Planetary Sciences 32, 111- 149.

Pieri P., Sabato L., Spalluto L., Tropeano M. (2011). *Carta geologica dell'area urbana di Bari in scala 1:25.000*. Rendiconti Online Società Geologica Italiana 14, 26- 36 doi:10.3301/U.G. 2011.03.

Schettini F. (1957). *I Restauri della Basilica*. Bollettino di San Nicola 109-114.

Schőnwiese C.D. (1995). *Volcanism and Climate*. Energy & Environment 6(2) 107-118.

Schmiedt G. (1975). *Antichi Porti d'Italia. Gli scali fenicio-punici. I porti della Magna- Grecia*. IGM Firenze.

Spilotro G., Leandro G. (2010). *Compatibilità geologico ambientale delle grandi opere e infrastrutture*. Geologia dell'Ambiente. SIGEA 4, 15- 25.

Toker E., Sivan D., Stern E., Shirman B., Tsimplis M., Spada, G. (2012). *Evidence for centennial scale sea level variability during the Medieval Climate Optimum (Crusader Period) in the eastern Mediterranean*, EPSL http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2011.07.019.

Vlora, N. R. (1975). *Considerazioni sulle variazioni della linea di costa tra Monopoli (Bari) ed Egnazia (Brindisi)*. Pub. 2, II Serie, Università di Bari, pp 67.

Le attività di gestione del rischio costiero nel Comune di Genova. Sostenibilità nella gestione della fascia costiera

Coastal risk management activities in the Municipality of Genova. Sustainability in the management of the coastal strip.

Luigi Perasso
A.S.TER. S.p.A. Genova

E-mail: perasso@geologiaverticale.it

Parole chiave: rischio costiero, gestione del rischio, fascia costiera di Genova
Key words: coastal risk, risk management, coastal strip of Genova

1. PREMESSA, CARTA D'IDENTITÀ DEL LITORALE GENOVESE

La fascia costiera compresa nel territorio comunale della città di Genova si estende per circa 30km, con andamento prevalentemente orientato secondo le direzioni SW-NE (per circa 4m) WNW-ESE (per circa 26km).

L'estremo occidentale (località Vesima) confina con il Comune di Arenzano, mentre quello orientale (quartiere di Nervi) confina con il Comune di Bogliasco (Fig. 1).

L'andamento del litorale è estremamente frastagliato, al punto che il reale sviluppo porterebbe l'estensione a oltre 45km.

Figura 1. Orientamento della costa di Genova.

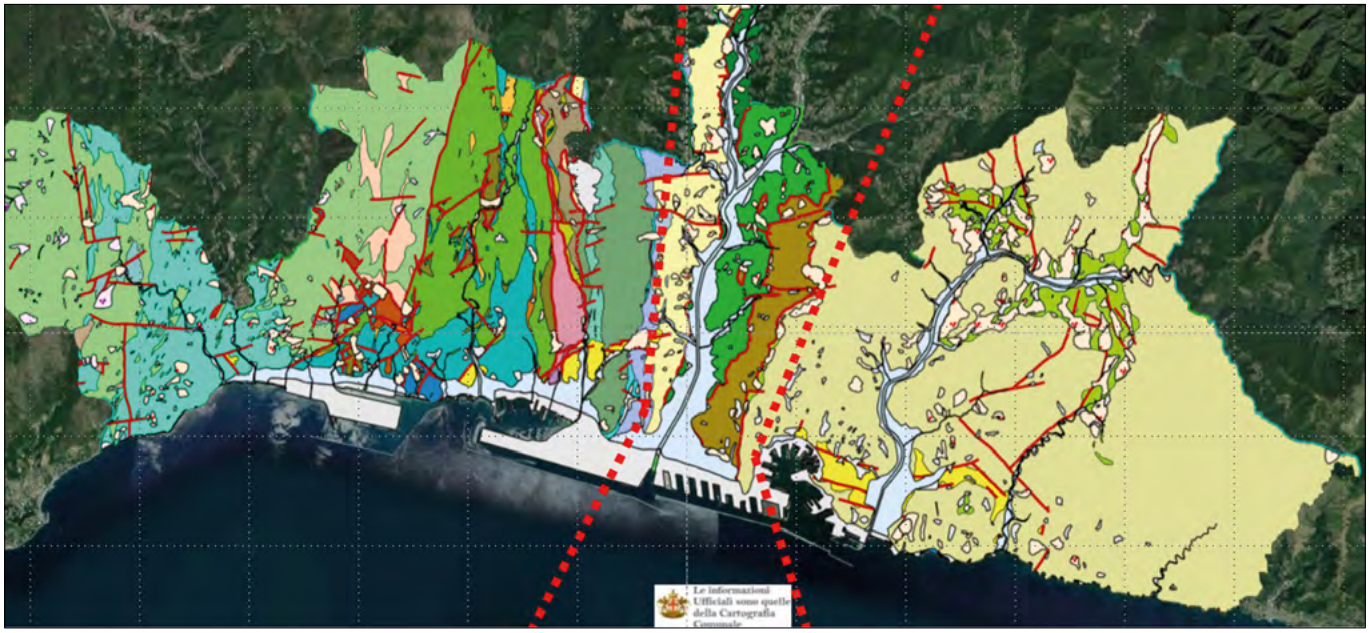


Figura 2. I litotipi affioranti lungo la costa del genovesato.

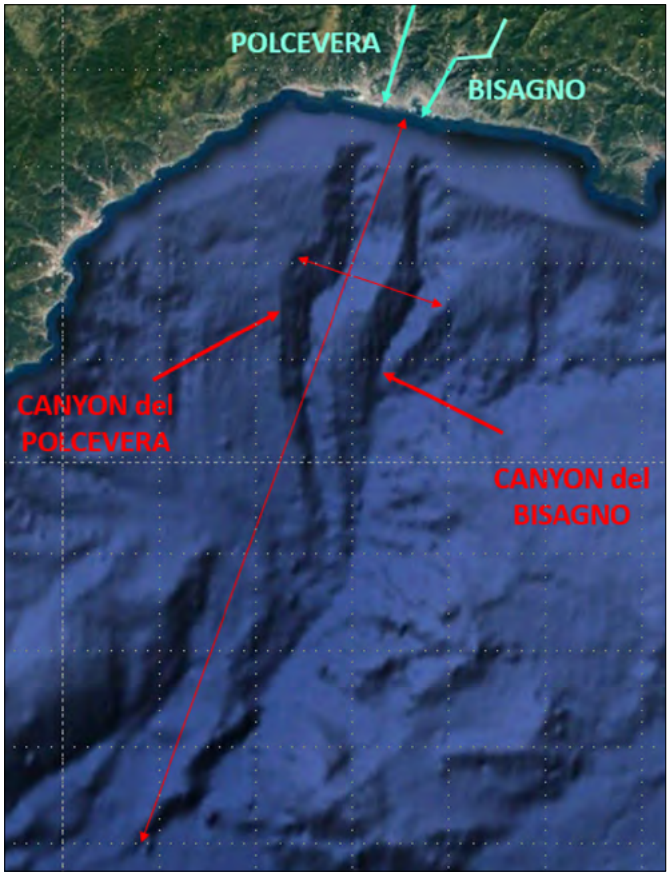


FIGURA 3. Fondali antistanti il tratto costiero di Genova.

Osservando la carta geologica (Fig. 2) tratta dal portale del Comune di Genova (https://geoportale.comune.genova.it/) si rileva la notevole varietà di litotipi affioranti lungo il litorale genovese; parzialmente celati dall'estesa area portuale distribuita principalmente nella parte centrale del tratto costiero, da Ovest verso Est, affiorano rispettivamente:

- Serpentiniti, Metabasalti e Calcescisti;
- Argilliti;
- Flysch e Argille.

Lo specchio acqueo antistante la fascia costiera è caratterizzato da fondali in rapido approfondimento; sono presenti inoltre due importanti canyons sottomarini, con andamento trasversale alla linea di costa: il canyon del Polcevera e il canyon del Bisagno (Fig. 3); entrambi hanno origine in corrispondenza delle foci dei due principali torrenti del genovesato, proseguendo per oltre 80km in direzione N-S. Le sommità delle sponde esterne dei due canyon distano tra loro circa 15km con pendenza, in certi punti superiore anche al 50%.

L'origine di questi due canyon sottomarini risale al Messiniano (oltre 5 milioni di anni fa), quando il mar Mediterraneo si si prosciugò e così rimase per oltre 600.000 anni in seguito alla chiusura dello stretto di Gibilterra. In quel periodo i torrenti di Genova sfociavano più a sud e più in basso di circa 2000 m.

Lungo la fascia costiera comunale si possono distinguere quattro tipologie di litorale (Fig. 4):

- costa rocciosa (16%), (Fig. 5)
- spiagge (22.4%), (Fig. 6)
- foci di corsi d'acqua (1.5%), (Fig. 7)
- infrastrutture portuali (60.1%), (Fig. 8).

L'intero territorio comunale è caratterizzato da una fitta rete di corsi d'acqua defluenti verso mare, molti dei quali ormai canalizzati entro sponde artificiali o addirittura confinati in anguste condotte sotterranee al di sotto del fitto tessuto urbano (Fig. 9).

FIGURA 4. Tratti costieri con caratteristiche omogenee.

FIGURA 5. Passeggiata A. Garibaldi, litorale di Nervi.

Figura 6. Bagni Lido, quartiere di Albaro

Figura 7. Foce del t. Sturla, quartiere di Sturla

Figura 8. Settore centrale del porto di Genova, tratto compreso fra le foci dei t. Polcevera e Bisagno

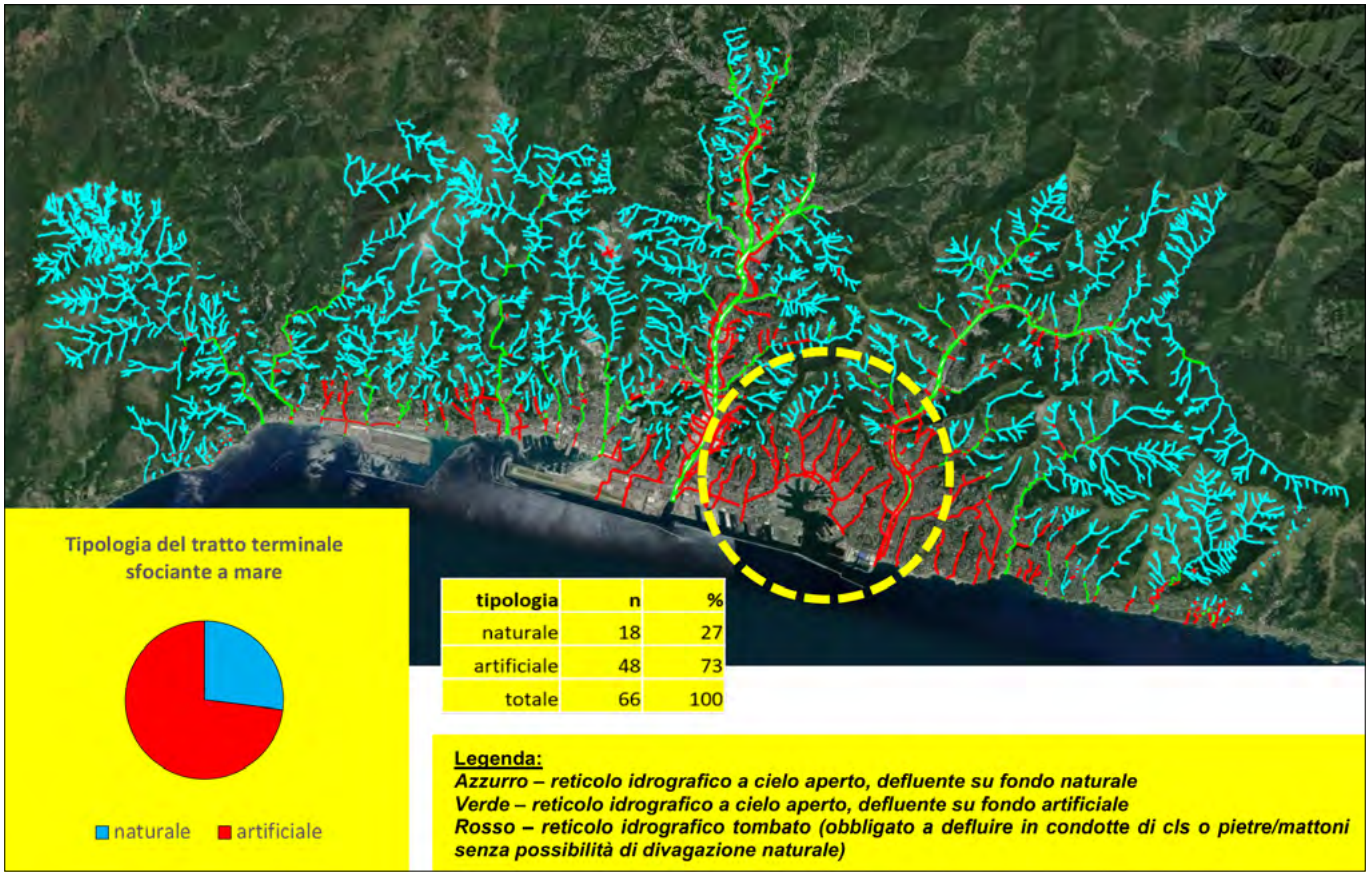


FIGURA 9. Il reticolo idrografico nel territorio comunale di Genova.

L'immagine di seguito riprodotta è tratta dal geoportale del Comune di Genova: https://geoportale.comune.genova.it/.

Particolare attenzione merita la porzione di tessuto urbano evidenziata con il circoletto tratteggiato, il cosiddetto Anfiteatro portuale di Genova: trattasi dell'area retrostante il nucleo più antico del porto ove il reticolo idrografico, ad eccezione delle aste iniziali defluenti ancora a cielo aperto, è del tutto celata sotto le strade e gli edifici, opera di tombintura iniziata già in epoca medioevale (Figg. 10 e 11).

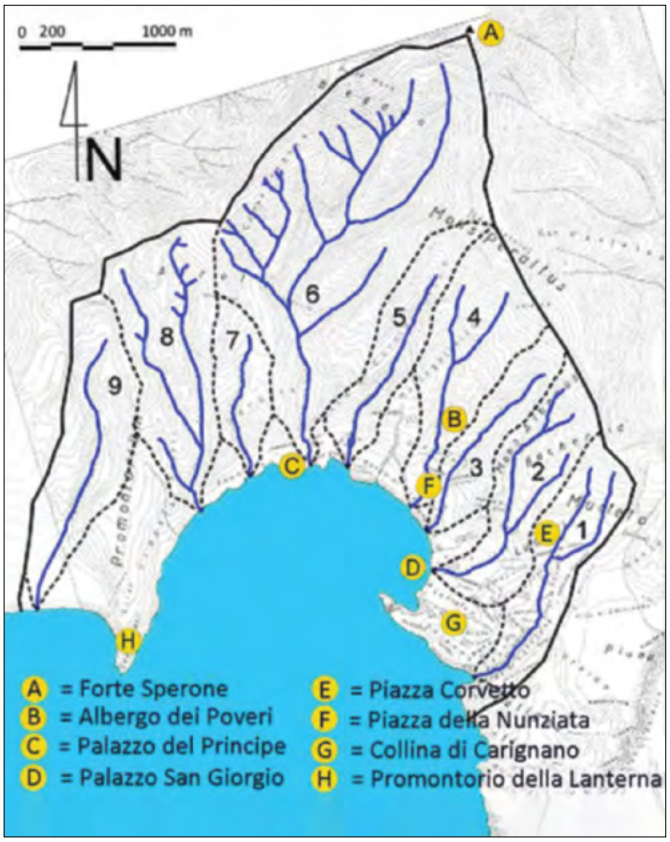


FIGURA 10. Reticolo idrografico area portuale.

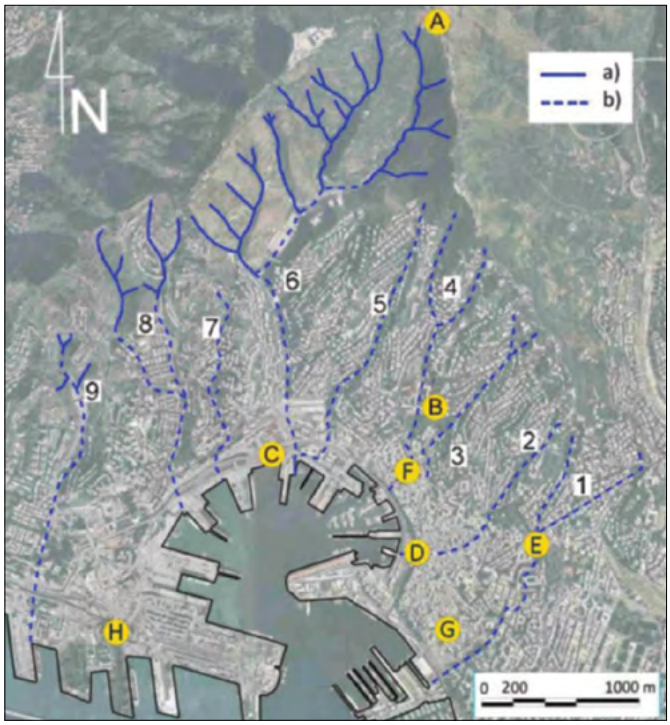


FIGURA 11. Reticolo idrografico area portuale
A) tratti a cielo aperto; b) tratti tombinati; 1) rio Torbido; 2) rio Sant'Anna;3) rio San Gerolamo; 4) rio Carbonara; 5) rio Sant'Ugo; 6) rio Lagaccio; 7) rio San Teodoro; 8) rio San Lazzaro; 9) rio S. Bartolomeo.

Figura 12. Foce del t. Bisagno: sx - Minuta di campagna scala 1:9450 Carta degli Stati Sardi di terraferma (1815-1823); dx – tessuto urbano odierno sopra la copertura totale del tratto terminale (rettangolo rosso).

Un caso esemplificativo di quanto appena accennato sia dal punto di vista del confinamento dell'alveo che dell'espansione urbanistica in fregio e sopra al corso d'acqua stesso, avvenuta soprattutto in tempi recenti è rappresentato dalla foce del t. Bisagno (Fig. 12), noto per le catastrofiche alluvioni del 1970, 2011 e 2014.

A completamento della conoscenza del tratto costiero viene riportato uno stralcio dell'Atlante degli habitat marini redatto da Regione Liguria (Fig. 13), in cui viene effettuata la mappatura dei fondali marini costieri. Particolare attenzione viene posta all'estensione della Posidonia oceanica (D.G.R. n. 141 del 28/02/2020).

Figura 13. Atlante degli habitat marini redatto da Regione Liguria.

Figura 14. Alcuni esempi di estuari fluviali genovesi con abbondante o ridotto trasporto verso mare (da sinistra a destra: t. Cerusa, t. Leiro, t. San Pietro, t. Polcevera.

La quasi totalità del litorale genovese è urbanizzata, con presenza di importanti infrastrutture litoranee (strade, ferrovie, ...) protette da opere realizzate a contrasto dell'azione erosiva marina; la possibilità di scambio di materiale dalla costa al mare e viceversa risulta pertanto estremamente ridotta. L'unica fonte di alimentazione "naturale" degli arenili è costituita dal materiale trasportato dai corsi d'acqua, frequentemente tombinati e quindi con esiguo apporto verso mare o con notevoli limitazioni alla deriva costiera (Fig. 14).

2. NORMATIVA REGIONALE DI RIFERIMENTO PER GLI INTERVENTI DI RIPASCIMENTO DEGLI ARENILI

Nel corso degli anni, si è reso necessario contribuire "artificialmente" nel ripascimento degli arenili, mediante interventi stagionali, strutturali, a difesa di tratti di litorale sia di costa bassa che di costa alta.

Ad oggi, Regione Liguria ha emanato una serie di normative a cui fare riferimento in caso di interventi sul litorale:

Figura 15. Deposizione di mezzo meccanico dalla strada sulla sottostante spiaggia.

- Delibera di Giunta regionale n.95 dell'8 febbraio 2017 Criteri generali da osservarsi nella progettazione degli interventi di ripascimento stagionali di cui alla D.G.R. n. 1209/2016.
- Deliberazione di Giunta regionale n.1209 del 20 dicembre 2016 Aggiornamento dei "Criteri generali da osservarsi nella progettazione degli interventi di ripascimento stagionali degli arenili" di cui alla D.G.R. n. 1446/2009
- La D.G.R. 1446/2009 sostituisce integralmente la D.G.R. 173/2006 e include i contenuti del protocollo per le analisi ed il campionamento del materiale destinato al ripascimento stagionale degli arenili redatto da ARPAL, menzionato nella delibera tecnica n°1176/2002.
- "Aggiornamento ed integrazione dei criteri generali da osservarsi nella progettazione degli interventi stagionali di ripascimento degli arenili (approvati con D.G.R. 1446/2009)": il documento stabilisce i requisiti tecnici necessari per la caratterizzazione dell'intervento anche per una sua valutazione, sia sotto il profilo dell'efficacia, sia sotto il profilo della compatibilità ambientale del materiale.
- Regolamento regionale n. 6 del 2002 "Disciplina del procedimento relativo all'approvazione degli interventi stagionali di ripascimento degli arenili": si tratta della procedura amministrativa che deve essere seguita per il rilascio delle autorizzazioni degli interventi.

A seconda dell'ubicazione del tratto di costa nel contesto cittadino su cui è necessario intervenire e della tipologia di materiale che occorre apportare sull'arenile, vengono adottate differenti tipologie di intervento:

- da terra, trasportando il materiale di ripascimento attraverso la viabilità urbana; la riprofilatura della spiaggia viene realizzata impiegando mezzi meccanici gommati o cingolati, a volte depositati sulla spiaggia con delicate operazioni di trasporto (Fig. 15, Fig. 16);
- da mare, impiegando apposite chiatte adibite al trasporto di blocchi lapidei di grosse dimensioni (svariate tonnellate) e alla loro movimentazione con gru munite di particolari dispositivi denominati polpi.

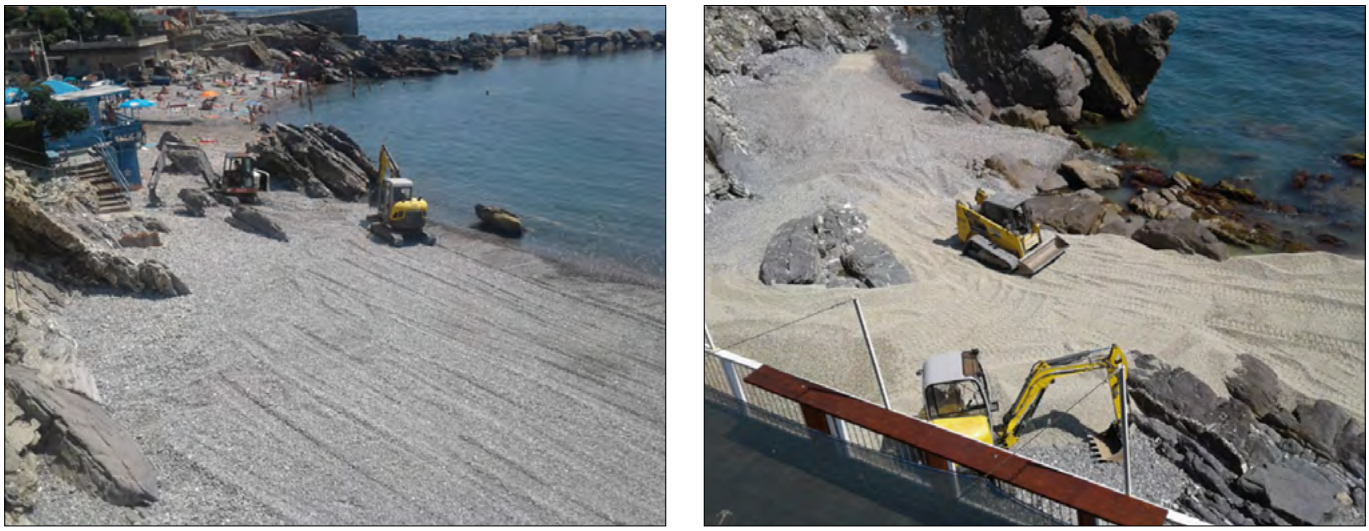


Figura 16. Fasi di stendimento dei materiali trasportati sulla spiaggia mediante mezzi meccanici.

Figura 17. Chiatta munita di gru e polpo per la movimentazione di grossi blocchi lapidei.

Figura 18. Spiaggia di san Giuliano d'Albaro (sopra: particolare tratto da I. Porro, 1823 circa; sotto: stato attuale).

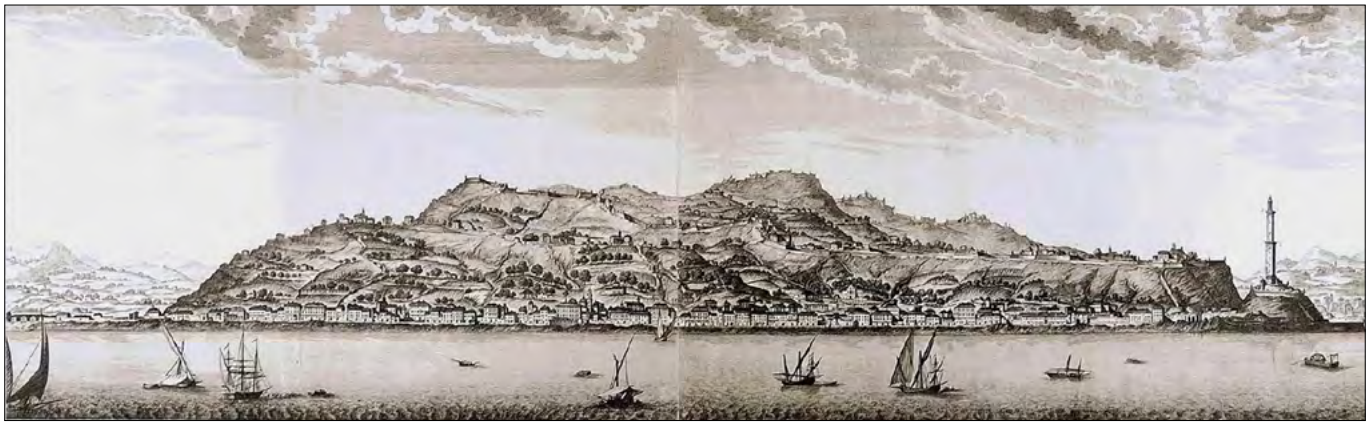


Figura 19. Panoramica dal mare del quartiere di Sampierdarena, ponente di Genova. Acquaforte, Antonio Giolfi (inventore), Giuseppe Riviera (disegnatore), G.L. Guidotti (incisore).

4. ANALISI DELLA CARTOGRAFIA STORICA DELLA FASCIA COSTIERA GENOVESE

Dalla comparazione della cartografia storica del litorale genovese con lo sviluppo delle attuali spiagge cittadine si osserva che alcune di queste spiagge sono "un'invenzione moderna"; buona parte del tratto costiero cittadino infatti fino alla prima metà del XIX secolo è sempre stato caratterizzato da ripide falesie rocciose totalmente prive di lembi sabbiosi stabili (Fig. 18, Fig. 19); il mantenimento delle spiagge risulta pertanto una forzatura innaturale che obbliga ad un periodico ripascimento artificiale con materiale estratto da cave non sempre reperite in ambito comunale.

BIBLIOGRAFIA

Bixio R., Faccini F., Maifredi A., Perasso L., Saj S., Traverso M., *The culverted streams in the historical amphitheatre of Genoa city (Italy): flood risk or geoheritage protection?* Hypogea 2017 – Proceedings of International Congress of Speleology in artificial cavities-Cappadocia, march 6/8 2017.

Cartografia storica e analisi digitale per le dinamiche costiere e opere di bonifica attorno all'antico lago Prile

Historical cartography and digital analysis for coastal dynamics and reclamation works around the ancient lake Prile

Leonardo Porcelloni
Università degli Studi di Verona

E-mail: leonardo.porcelloni@univr.it

Parole chiave: Cartografia storica, dinamiche costiere, opere di bonifica
Key words: Historical cartography, coastal dynamics, reclamation works

INTRODUZIONE

In questo articolo recupero il tema della presentazione condotta durante il convegno SIGEA del 23 ottobre 2020. Il contributo si è concentrato sulla ricerca svolta in riferimento all'elemento idrico come costante nel territorio della maremma grossetana, un'area che è stata oggetto di importanti trasformazioni. In particolare, l'attenzione è stata rivolta all'evoluzione delle aree umide intorno al lago Prile, degradate da eventi naturali ma anche risanate grazie agli interventi per la bonifica e la riqualificazione del territorio. L'obiettivo del contributo è di ripercorrere le vicende storico-geografiche di questa parte della maremma grossetana, mettendo in evidenza le trasformazioni del territorio compreso fra Castiglione della Pescaia e la foce dell'Ombrone evidenziandone l'importanza delle acque nella composizione del paesaggio.

L'indagine esamina le principali tappe delle opere di bonifica relative al periodo granducale sino all'istituzione della Riserva Naturale del 1996. Successivamente, vengono discussi i risultati frutto dell'analisi GIS di uso e copertura del suolo mettendo a confronto tre secoli (dal XIX al XXI) anche in riferimento all'evoluzione dello scenario costiero.

Ciò ha consentito di produrre una narrazione delle fondamentali trasformazioni territoriali mediante la consultazione della cartografia storica e la realizzazione di mappe tematiche.

LE PRIME OPERE DI BONIFICA E LE CARTE GRANDUCALI

La bonifica delle terre è stata un'importante politica agraria promossa in Italia dai vari poteri centrali negli ultimi quattro secoli. In questo contesto, è emersa una notevole produzione cartografica nell'Italia preunitaria, con commissioni rivolte alla regimazione delle acque interne e delle aree umide. In tale contesto, è importante tener presente l'aspetto della committenza nell'analisi delle carte antiche e moderne, al fine di contestualizzarne gli obiettivi e le necessità dell'epoca.

Il periodo del Granducato di Toscana con la reggenza lorenese ha attirato particolare attenzione, ma fu con Cosimo I de' Medici che incominciò l'interesse nei confronti della situazione pietosa della Maremma grossetana, avviando l'escavazione dei primi canali di scolo intorno al 1580 (ad esempio il fosso detto «*Molla vecchia*», qualche chilometro a settentrione di Grosseto). Tuttavia, gli interventi erano occasionali e non fu seguito un programma organico di bonifiche, spesso legati agli interessi del sovrano per migliorare le condizioni delle aree dove si trovavano fattorie o peschiere granducali. Nonostante ciò, gli studiosi come Zuccagni-Orlandini hanno sostenuto la provvidenza degli interventi dei Medici nel promuovere la bonifica delle terre:

«La storia sta a loro difesa, ricordando che il noto *Uffizio dei Fossi* debbe anzi ad essi la providissima sua istituzione».

La storia della cartografia dimostra che fino al XVIII secolo qualsiasi rappresentazione cartografica risultava assai difettosa a causa dell'assoluta mancanza di determinazioni astronomiche e di rilevamenti geodetici sufficientemente precisi (Fig. 1).

Nel 1737, la dinastia lorenese ottenne il diploma imperiale della carica granducale, inaugurando un'epoca eroica per la Maremma. Dal XVIII secolo, il governo centrale fiorentino e la dinastia dei Lorena promossero una serie di operazioni e riforme volte a razionalizzare l'agricoltura toscana, tra cui la bonifica e la canalizzazione delle aree umide e l'impianto di pinete litoranee. L'interesse acquisito lo si deduce anche dalla produzione cartografica appunto per monitorare lo stato dell'arte e progettare i successivi interventi. Il vero e proprio periodo di rinnovo della politica granducale si ha con la nomina dell'erede terzogenito Pietro Leopoldo nel 1765. Con le redini del Granducato nelle sue mani, si conobbe la fase più evolutiva ed illuminata del governo lorenese. Nel 1758, il matematico Ximènes fu invitato a fare un sopralluogo in Maremma, la cui idea progettuale non era quella di prosciugare completamente i grandi laghi palustri toscani, ma di conservarli, purché regolati nel regime delle acque e resi innocui dal punto di vista malarico (Fig. 2). A dimostrazione che la bonifica ximeniana si configura quasi sempre con interventi di canalizzazione, lo stesso matematico annotò:

«Questa riduzione in altro non consiste che nel ricavamento de' Canali e Scoli maestri delle pianure Maremmane, che non erano stati espurgati a memoria di uomini.

Figura 1. «*Tusciæ degantioris Italiæ partis Corographiam descripsimus atque ita guidem ut nihil amplius in ea desiderari possit*», Hieronimo Bell'Armato, 1550 ca. Si noti lungo la linea di costa, dove si incontra «Castiglioni», l'approssimativa rappresentazione del territorio lacustre con l'Isola Clodia al suo centro. Fonte: Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze (Palat. Cart. a.b.311).

Consiste nel facilitare il discarico delle acque de' Laghi e delle Paduline, che si lasciavano chiuse e stagnanti. Consiste nel serrare le aperte Arginature de' Fiumi che con cento Bocche passavano ad allagar le pianure con danno considerevole del Bestiame e delle Semente».

Tra il 1828 ed il 1859 i risultati furono assai rilevanti in seguito alla razionale organizzazione in una maglia di canali su tutto il territorio della Maremma palustre a nord dell'Ombrone. L'opera, che si protrasse per oltre trent'anni, comportò una spesa di oltre 20 milioni di lire toscane, a carico del Granducato, e portò al risanamento di 110.000 ettari di terreno. Furono costruite strade per oltre 400 chilometri, 126 ponti, introdotte alberature e piante domestiche che contribuirono alla trasformazione del paesaggio agrario, scavati chilometri e chilometri di canali di bonifica e canali di derivazione dell'Ombrone per alimentare le colmate. Tra il 1828 e il 1859 i risultati furono assai rilevanti grazie all'organizzazione razionale di una maglia di canali su tutto il territorio della Maremma palustre a nord dell'Ombrone.

Nel corso del Regno d'Italia non si sono verificati miglioramenti per quanto riguarda la bonifica del territorio. Al contrario, si è assistito a un graduale peggioramento a causa dell'incuria, fino alla firma della «legge organica in tema di bonifica» nel 1882. Durante il periodo fascista, grazie alle leggi di bonifica integrale e all'introduzione delle idrovore elettriche, il prosciugamento del padule di Castiglione è stato accentuato. In questo periodo, l'obiettivo non era più la sconfitta della malaria, poiché la causa era ormai nota, ma il recupero di ulteriori terreni agricoli. Dopo i primi progetti idraulici di riparazione dei danni causati dalla Seconda Guerra Mondiale, la pianura è stata investita dal processo di appoderamento e meccanizzazione agricola, in linea con la Riforma Agraria del 1950. Grazie anche all'Ente Maremma, sono state fondate diverse case coloniche e consorzi agricoli, la pianura era attraversata da una fitta rete di canali di scolo, strade, linee elettriche e acquedotti, che hanno favorito ulteriori specializzazioni agricole. Oggi, l'ultimo testimone di quello che era l'ampio lago Prile è il padule della Diaccia Botrona, inserito all'interno della Convenzione di Ramsar del 1971 e dichiarato Riserva Naturale Provinciale nel 1996.

L'ANALISI DIGITALE TRA I SECOLI XIX E XXI

La seconda parte dell'indagine riguarda l'analisi diacronica di diverse fonti cartografiche dal XIX secolo ai giorni nostri relative all'uso del suolo. La prima fonte utile è il Catasto Generale della Toscana, costruito mediante un procedimento geometrico-matematico rigoroso che con-

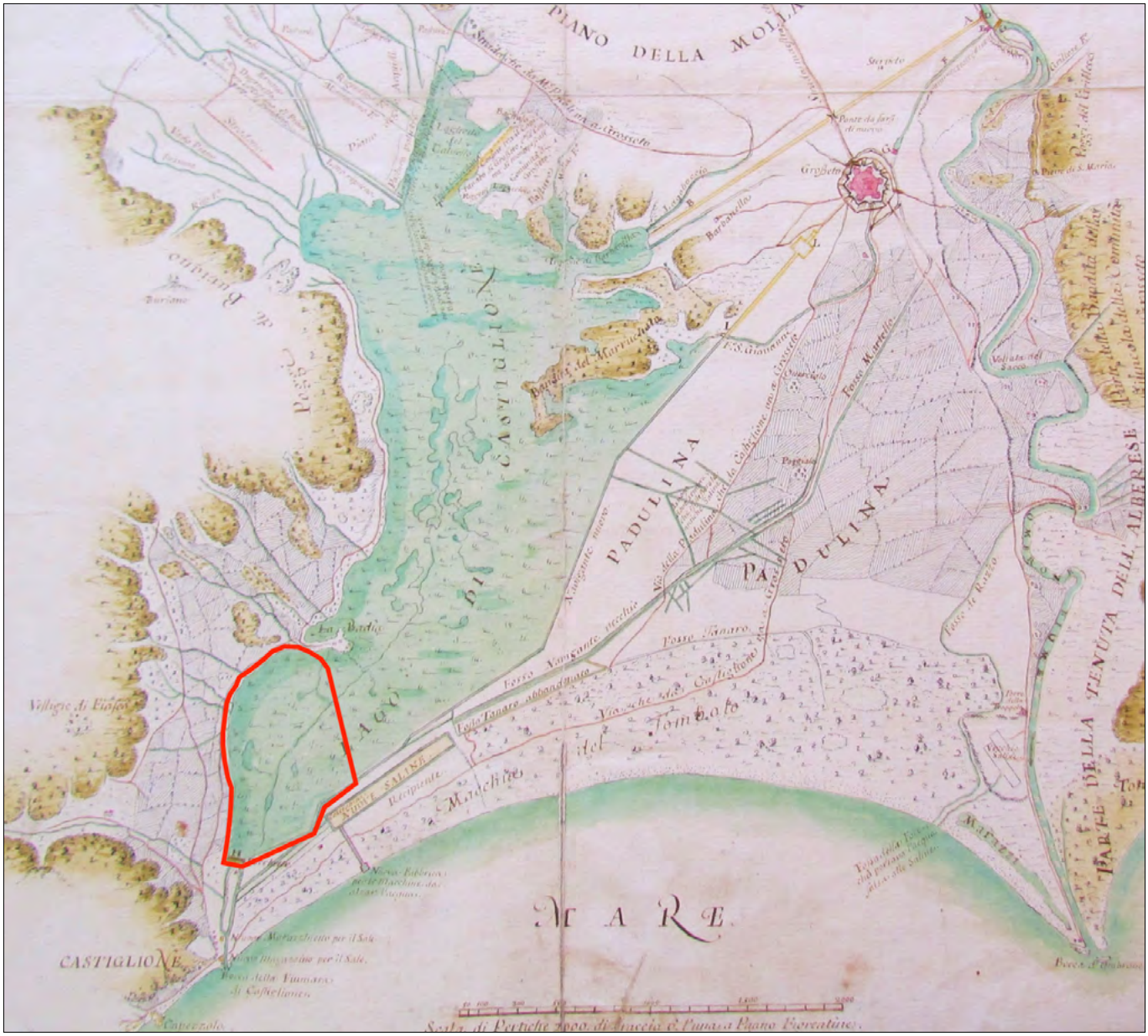


FIGURA 2. «*Carta topografica generale del Lago di Castiglione e delle sue adiacenze sino alla radice de' poggi*», Leonardo Ximèmes, 1758-1759. Il poligono in rosso è stato realizzato e sovrapposto dall'autore per mostrare l'attuale estensione del territorio palustre. Fonte: Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze (N.A. cart. VII, 57).

sente la georeferenziazione e sovrapposizione alle carte contemporanee. Il Catasto è stato digitalizzato e le relative informazioni sull'uso del suolo, estratte dalle tavole indicative, sono state informatizzate per configurare le relative carte tematiche. La fotointerpretazione è stata eseguita sulle foto aeree del Volo GAI del 1954 e sulle ortofoto del 2012. Tuttavia, a causa delle differenze di natura e di procedura tra le fonti, si deve tenere presente di un probabile margine di errore nell'omogeneizzazione dei dati rispetto al modello Corine Land Cover. I dati vettoriali consentono un'analisi sia sincronica che diacronica, ma anche scalare; ciò permette di passare da un livello di dettaglio a un altro. Ad esempio, per evidenziare le trasformazioni territoriali, è stato privilegiato il confronto fra elementi macroscopici come le aree artificiali in generale rispetto a quelle agricole, piuttosto che comparare le varie categorie di coltivazione o di copertura vegetale. Poiché l'analisi riguarda l'uso del suolo, si parla del paesaggio come palinsesto dei fenomeni territoriali. La composizione del paesaggio è stata frammentata e nuovamente riassemblata per avvicinarla il più possibile alla realtà scientifica, oltre che alla realtà estetica e percettiva.

L'analisi delle superfici artificiali rivela un primo sviluppo insediativo fino alla prima metà del Novecento, con un aumento significativo del tessuto urbano nella seconda metà del secolo. Si osserva inoltre una concentrazione delle zone urbane lungo le coste e l'area di rispetto delle riserve naturali. Dalle superfici agricole viene mostrato un aumento nel periodo tra il XIX e il XX secolo, grazie alle opere di bonifica, mentre si registra una lieve riduzione nel periodo che va dagli anni 2000 in poi, a causa della destinazione turistica delle terre, dello sviluppo urbano e della rinaturalizzazione di alcune aree. La trasformazione dell'agricoltura da monoculturale a specializzata è evidente. L'analisi delle superfici naturali rivela che l'avanzamento delle aree verdi/naturali è correlato alla riduzione delle aree umide e del terreno agricolo, con un espandersi dei boschi a nord delle zone collinari. L'indagine sulle aree umide è limitata

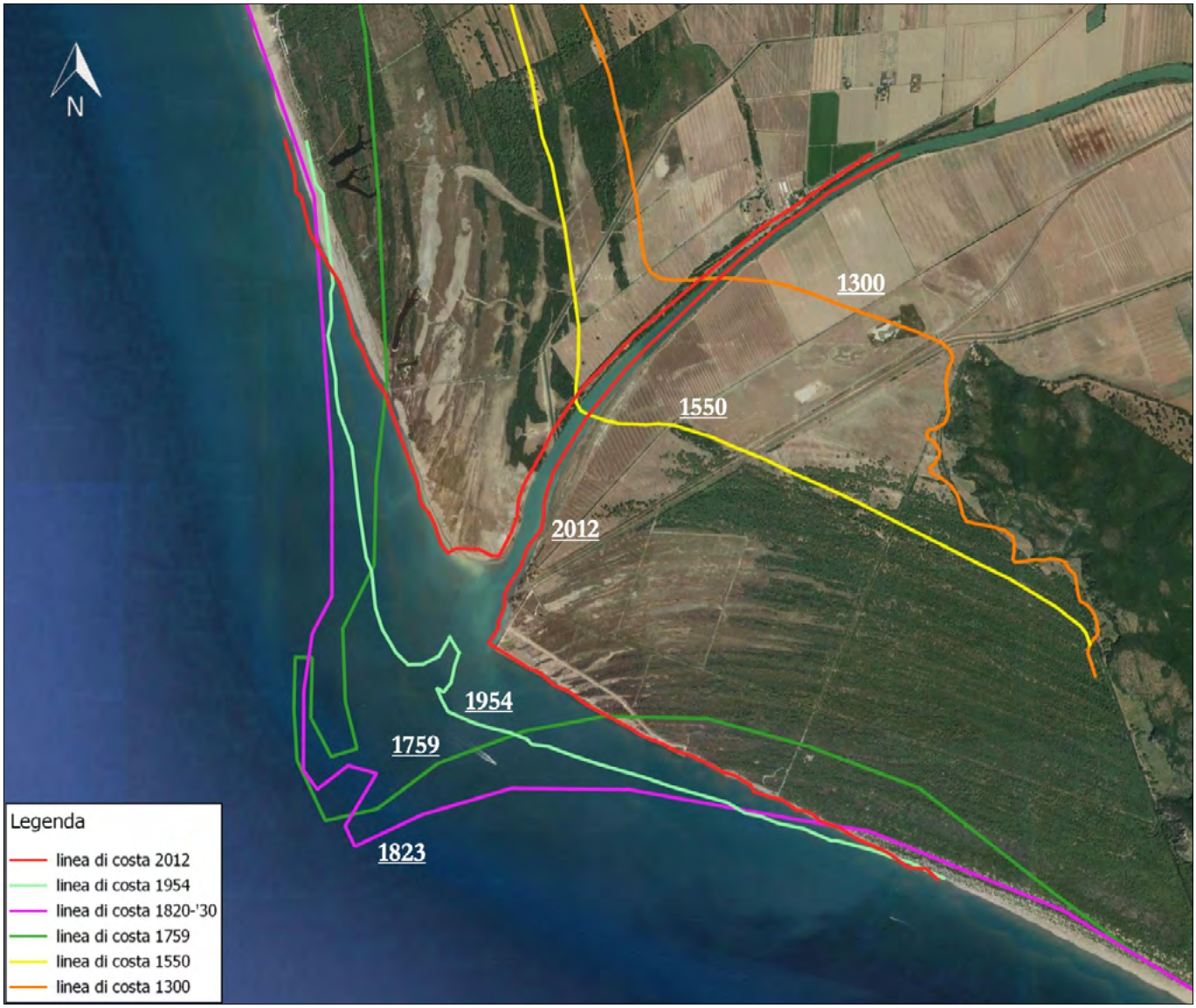


Figura 3. Delta del fiume Ombrone e sovrapposizione diacronica delle linee di costa. Fonte: elaborazione dell'autore. I dati sulla linea di costa 1300, 1550, e 1759 sono stati gentilmente forniti dal Prof. Carlo Citter (Università degli Studi di Siena).

dalla mancanza di dati sul Catasto Leopoldino e dal fatto che l'area di studio non comprende tutta la sezione del padule dell'800. Tuttavia, la riduzione delle aree umide è evidente sia a livello cartografico che numerico: nell'arco di due secoli sono stati prosciugati più di 1.500 ha di terreni. Infatti, ben si distingue il massiccio prosciugamento delle aree impaludate e l'infittirsi delle opere di canalizzazione delle acque.

In generale, lo studio dimostra una lenta transizione da un'area gestita da un sistema agro-silvo-pastorale e sottoposta a inondazioni periodiche, ad una pianura caratterizzata da aziende agricole altamente produttive e fortemente meccanizzate, oltre che da *sprawl* urbano e da attività terziarie, quali il turismo balneare o l'agriturismo.

Infine, è stato discusso il sistema evolutivo della linea di costa con particolare riferimento al delta del fiume Ombrone. Nella figura 3, l'evoluzione diacronica è rappresentata attraverso l'analisi sovrapposta di diversi momenti storici. Tale figura consente di comprendere il fenomeno costiero nella zona in questione, evidenziandone tre importanti fasi per i cambiamenti ambientali: l'inizio del XIV secolo, quando la costa comincia ad avanzare a seguito dell'alluvione dei primi anni del 1300. Tra i secoli XVI-XIX il litorale avanza rapidamente grazie all'alluvione avvenuta tra il 1557 e il 1758. Pertanto, inizialmente, la forte erodibilità delle formazioni plioceniche argilloso-sabbiose dei terreni su cui scorre l'Ombrone ha determinato una lunga fase di avanzamento della costa, la quale ha portato alla formazione di un cordone sabbioso emerso sopra il livello delle acque. Infine, dal XX secolo, la linea di costa ha subito un netto arretramento: oggi si può osservare una fase di retrogradazione che indica un rischio di arretramento costiero, a causa del processo erosivo del mare, che si è sostituito a quello di sedimentazione.

CONCLUSIONI

La pianura costiera di Grosseto era prevalentemente paludosa, boscosa e incolta dalla tarda antichità fino alla metà del XVIII secolo. Anche a causa della malaria, si conobbe un forte declino della popolazione dell'area, ad eccezione della piccola città di Grosseto e della comunità di Castiglione della Pescaia. Negli anni '60 del XVIII secolo, il governo del Granducato di Toscana ha prosciugato le acque e approvato varie innovazioni, tra cui riforme ammini-

strative, liberalizzazione economica, distribuzione di terre a proprietari terrieri benestanti per incoraggiare la modernizzazione del sistema agricolo. Le condizioni idrografiche della pianura sono poi peggiorate tra il XIX e il XX secolo, ma il governo fascista ha riattivato in modo massiccio le opere pubbliche che hanno trasformato il territorio. Con il completo prosciugamento delle acque tra gli anni '20 e '40 e la riforma agraria del 1950, la pianura di Grosseto ha assunto le caratteristiche che sono oggi note: lo sviluppo di centri turistici sulla costa, la costruzione di una fitta rete di piccole e medie aziende agricole e la protezione di alcune zone rimaste uniche come habitat naturali.

In definitiva, la fragilità e la diversità ecologica del territorio dell'area in esame richiedono la definizione di adeguate norme di protezione per preservarne le sue caratteristiche uniche. In particolare, oggi, il turismo rappresenta una sfida per il territorio, in quanto richiede infrastrutture di accoglienza specifiche e può portare a una localizzazione del massiccio assalto turistico in determinate aree. La cartografia storica e l'analisi digitale diacronica del territorio possono rappresentare strumenti preziosi per comprendere le dinamiche ambientali e antropiche del territorio.

BIBLIOGRAFIA

Arnoldus-Huyzendveld A., Citter C. (2011). *Uso del suolo e sfruttamento delle risorse nella pianura grossetana nel Medioevo: verso una storia del parcellario e del paesaggio agrario*, Artemide, Roma.

Barsanti D. (1984). *Castiglione della Pescaia. Storia di una comunità dal XVI al XIX secolo*, Sansoni, Firenze.

Barsanti D., Rombai L. (1987). *Leonardo Ximènes. Uno scienziato nella Toscana lorenese del Settecento*, Medicea, Firenze.

Ciampi G. (2007). *Retrogradazione del delta dell'Ombrone e ricerca dei suoi fattori attraverso l'interpretazione cartografica*, in Scapini F., Nardi M. (a cura di), *Il Parco Regionale della Maremma e il suo territorio*, Pacini, Pisa.

De Silva M., Guarducci A., Rombai L. (2013). *The Grosseto plain (Tuscany, Italy) in historical maps (18th - 20th centuries): Georeferencing of historic landscape*, e-Perimetron, Vol. 8, n. 1, pp. 21-36.

Farinelli R. (2013). *Fortificazioni di terra nella Maremma toscana: evidenze archeologiche e testimonianze documentarie per i secoli X-XIV*, in Settia A., Marasco L., Saggioro F. (a cura di), *Archeologia Medievale*, All'Insegna del Gilgio, Firenze.

Farinetti E. (2012) *I paesaggi in archeologia: analisi e interpretazione*, Carocci Editore, Roma.

Fonnesu I., Guarducci A., L. Rombai (2002). *Ambienti e paesaggi della Maremma Grossetana*, Rassegna Storica Toscana, n. 48, pp. 285-370.

Gabellieri N. (2018). *Terre divise. La Riforma Agraria nelle Maremme toscane*, Aracne, Canterano.

Guarducci A., Rombai L. (2020). *Castiglione della Pescaia nei secoli XVI-XIX. Mappe e territorio*, Aska, Montevarchi.

Porcelloni L. (2017). *I processi di risanamento e valorizzazione sulla costa toscana, tra cartografia storica e analisi digitale,* in CARALLO S. (a cura di) *Il progetto del territorio nelle fonti d'archivio.* Laboratorio Geo-Cartografico "Giuseppe Caraci", n. 2, LabGeo Caraci, Roma, pp. 131-149.

Repetti E. (1841). *Dizionario Geografico Fisico Storico della Toscana contenente la descrizione di tutti i luoghi del Granducato*, presso l'autore e editore coi tipi Allegrini e Nazzoni, Firenze.

Rombai L. (a cura di) (1993). *Imago et descriptio Tusciae. La Toscana nella geocartografia dal XV al XIX secolo*, Marsilio, Venezia.

Rombai L., Barsanti D. (1986). *La "Guerra delle Acque" in Toscana. Storia delle Bonifiche dai Medici alla Riforma Agraria*, Medicea, Firenze.

Rombai L. (2010). *Le problematiche relative all'uso della cartografia storica*, Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia, n. 138, pp. 69-89.

Ximènes L. (1769). *Della fisica riduzione della Maremma senese. Ragionamenti due a' quali si aggiungono quattro perizie intorno alle operazioni della pianura grossetana ed all'arginatura del fiume Ombrone*, Stamperia di Francesco Moucke, Firenze.

Zuccagni-Orlandini A. (1841). *Corografia fisica, storica e statistica dell'Italia e delle sue isole corredata di un atlante di mappe geografiche e topografiche e di altre tavole indicative*, Presso Gli Editori, Firenze.

Il ripascimento delle spiagge turistiche

The nourishment of tourist beaches

Enzo Pranzini
Università degli Studi di Firenze
Gruppo Nazionale pere la Ricerca sull'Ambiente Costiero

E-mail: enzopranzini@unifi.it

Parole chiave: ripascimento, erosione costiera, spiagge ad uso turistico-balneare
Key words: artificial beach nourishment, coastal erosion, beaches for tourist-bathing use

PREMESSA

Il ripascimento artificiale delle spiagge consente di contrastarne l'erosione e di ampliarne la superficie per l'uso turistico-balneare, ma le due finalità, apparentemente convergenti, risultano spesso conflittuali, e ogni progetto deve avere ben chiaro l'obiettivo prioritario da raggiungere. Ambiguità in questo senso possono portare all'insuccesso del progetto e a contestazioni da parte degli utilizzatori, siano essi privati cittadini che operatori economici.

Qui ci occuperemo quasi esclusivamente del ripascimento artificiale finalizzato alla realizzazione, ricostituzione o ampliamento di spiagge destinate all'uso turistico-balneare, pur facendo cenno, occasionalmente, ad aspetti che toccano anche la difesa dei litorali dall'erosione.

La zona di prelievo dei materiali (offshore, nearshore, terra), la dimensione, la forma e il colore dei grani, così come il volume impiegato e la posizione sul profilo della spiaggia in cui vengono posti, possono variare notevolmente da un intervento all'altro. I progetti tengono conto dello stato della spiaggia, dell'energia del moto ondoso, delle esigenze degli utenti, dei vincoli ambientali e, ultimo ma non meno importante, delle risorse economiche disponibili. In rari casi il ripascimento della spiaggia viene effettuato per consentire la ricostituzione di habitat naturali in luoghi in cui lo sviluppo antropico li ha distrutti.

Molto è stato scritto sull'efficienza del ripascimento delle spiagge per combattere l'erosione costiera, sul suo impatto positivo e negativo sull'ambiente e sulle sue ricadute economiche sulle comunità locali; meno si sa su quanto è stato fatto con la specifica finalità di incrementare l'offerta turistica, magari realizzando spiagge dove non erano presenti.

Nella maggior parte dei progetti finalizzati al contrasto dell'erosione, l'obiettivo principale è, giustamente, la stabilità (o longevità) del ripascimento, mentre viene data scarsa importanza alla qualità della sabbia dal punto di vista degli utenti della spiaggia, cosa di estrema importanza nelle località dove il turismo balneare è una risorsa economica fondamentale. Qui l'obiettivo dovrebbe essere quello di creare una superficie ampia e piacevole, nonché fornire un accesso facile e sicuro all'acqua.

La convergenza delle due necessità (difesa e turismo) porta talvolta ad accettare una longevità limitata del ripascimento se il rapporto costi/benefici è positivo, cosa che avviene spesso dove la stagione balneare è limitata ai mesi estivi e la spiaggia è la base dell'offerta turistica; vengono

Figura 1. Ripascimento con sabbia dragata in mare su di una spiaggia protetta da scogliere parallele sommerse (Grottammare, Marche).

così effettuati ripascimenti periodici sia per mantenere un arenile in grado di dissipare l'energia delle onde, sia per sostenere questa attività, che deve essere considerata non soltanto economica, perché la spiaggia ha, più che altro, un valore sociale.

Ma è proprio l'elevato valore economico della spiaggia, di cui beneficiano non solo gli imprenditori che operano in prossimità del mare ma anche un vasto territorio retrostante, che giustifica i forti investimenti che si fanno in questo ambito, anche se spesso portano ad interventi che non risolvono il problema dell'erosione costiera, e spesso questo accade proprio perché si è cercato di rispondere alle due esigenze diverse.

Per ridurre la perdita di sedimenti lungo la costa e verso l'esterno, i ripascimenti artificiali vengono spesso accompagnati dalla costruzione strutture emerse o sommerse (pennelli e scogliere parallele). Più frequentemente, il ripascimento della spiaggia viene eseguito su coste in cui queste strutture erano già presenti, anche nel caso in cui, pur avendo risolto il problema dell'erosione costiera, non avevano fatto sviluppare una spiaggia idonea alle attività turistiche.

Comunque, pur essendo considerata una tecnica di protezione 'morbida' della costa, il ripascimento delle spiagge è un'azione invasiva che danneggia l'ambiente, e può avere impatti sul paesaggio, sulla flora e sulla fauna. Dopo oltre 50 anni di esperienza, anche se non sempre sono stati condotti studi approfonditi, questi problemi sono noti e il ripascimento artificiale dovrebbe essere limitato e attentamente monitorato. Alimentare una spiaggia naturale, magari in un Parco Nazionale, non è la stessa cosa che realizzare un progetto simile in una spiaggia urbana, dove l'ambiente, in terra e frequentemente anche in mare, è stato fortemente modificato da molti anni, se non da secoli.

LA LARGHEZZA DELLA SPIAGGIA

La larghezza della spiaggia è importante per gli utenti della spiaggia, e l'espansione dell'arenile per ospitare più persone si è rivelata un'attività altamente remunerativa, tanto che in alcune località il ripascimento viene effettuato anche se la costa non è in erosione.

Comunque, oltre all'aspetto economico, una spiaggia più ampia può dissipare meglio l'energia delle onde,

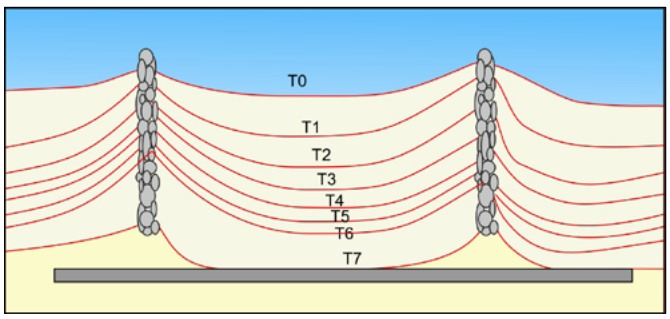


Figura 2. Una spiaggia delimitata da pennelli, se sovra alimentata, perde rapidamente sabbia, ma poi il tasso di arretramento si riduce fino a che la sua larghezza non diventa insufficiente a contenere la risalita delle onde che, se raggiungono strutture riflettenti, vengono riflesse e fanno aumentare la velocità di erosione. Ricariche periodiche dovrebbero mantenere la linea di riva fra le posizioni T3 e T6 per avere il minimo di perdite.

proteggere le strutture costiere e prevenire le alluvioni da mareggiata, ma un suo eccessivo allargamento può fare aumentare le perdite verso il largo e lungo la costa, in particolare se raggiunge o supera le strutture di difesa. Questo problema viene considerato anche nella previsione dei tempi di ricarica: si cerca un compromesso tra il mantenimento di una spiaggia sufficientemente ampia da proteggere gli edifici costieri e consentire l'attività turistica, e non ampliarla eccessivamente per limitare la perdita di sedimenti (Fig. 2).

Un altro elemento da considerare è il costo unitario del ripascimento, soprattutto se eseguito con sedimenti offshore: il costo di mob-demob (mobilizzazione e smobilitazione di draghe, posa di condotte, allestimento di piazzali, ecc.) è fisso e viene meglio compensato se vengono spostati grandi volumi di sabbia.

Vi sono però anche alcuni aspetti legati alla fruizione della spiaggia che ne sconsigliano un ampliamento eccessivo. Il valore più elevato della spiaggia, confermato dalla densità dei bagnanti monitorata attraverso immagini telerilevate (webcam, fotografie aeree, immagini satellitari) lo si trova su di fascia stretta lungo la zona battigia. La desiderabilità diminuisce andando verso terra, per aumentare ancora, ma senza competere con la prima, avvicinandosi a dune vegetate, alberi e servizi (bar, docce, servizi igienici, ecc.). L'ampliamento della fascia intermedia ha lo stesso costo unitario della realizzazione della stessa superficie nella zona più ambita.

Problemi simili si riscontrano quando la larghezza della spiaggia è aumentata a causa della costruzione di porti, di moli guardiani o anche degli stessi pennelli realizzati per la sua difesa: i servizi di ristorazione (chioschi, bar, ristoranti) sono troppo lontani dalla fascia più appetita e i bagnanti non si muovono per raggiungerli, tanto che i gestori si lamentano il minor guadagno! Si può giungere all'assurdo che dopo un forte incremento di superficie non si chieda l'estensione della concessione, lasciando il tratto di spiaggia intermedio deserto o libero anche ai non clienti (Fig. 3).

L'ampliamento della spiaggia, sia libera che in concessione, richiama un maggior numero di bagnanti che devono poi trovare un adeguato numero di servizi (bagni, docce, bagnini, parcheggi, ecc.)

Vi sono studi che dimostrano come quanto più grande è la spiaggia, tanto minore è la sua produttività specifica (€/m^2); pertanto l'allargamento di una spiaggia stretta è vantaggioso, ma oltre certe dimensioni non è economicamente conveniente. Tutte queste considerazioni (tecniche, economiche e sociali) mostrano quanto sia impegnativa la valutazione dell'ampiezza della spiaggia da raggiungere con un ripascimento nelle zone turistiche.

IL PROFILO DELLA SPIAGGIA

Gli operatori del settore balneare chiedono di privilegiare la spiaggia asciutta durante le operazioni di ripascimento, per avere subito una superficie più ampia da destinare al turismo e per proteggere le strutture ricreative. Progettisti e committenti, ma anche decisori (politici) sono sensibili a questa richiesta e la spiaggia emersa viene sovraccaricata di sedimenti, acquisendo un profilo innaturale. Questa alta

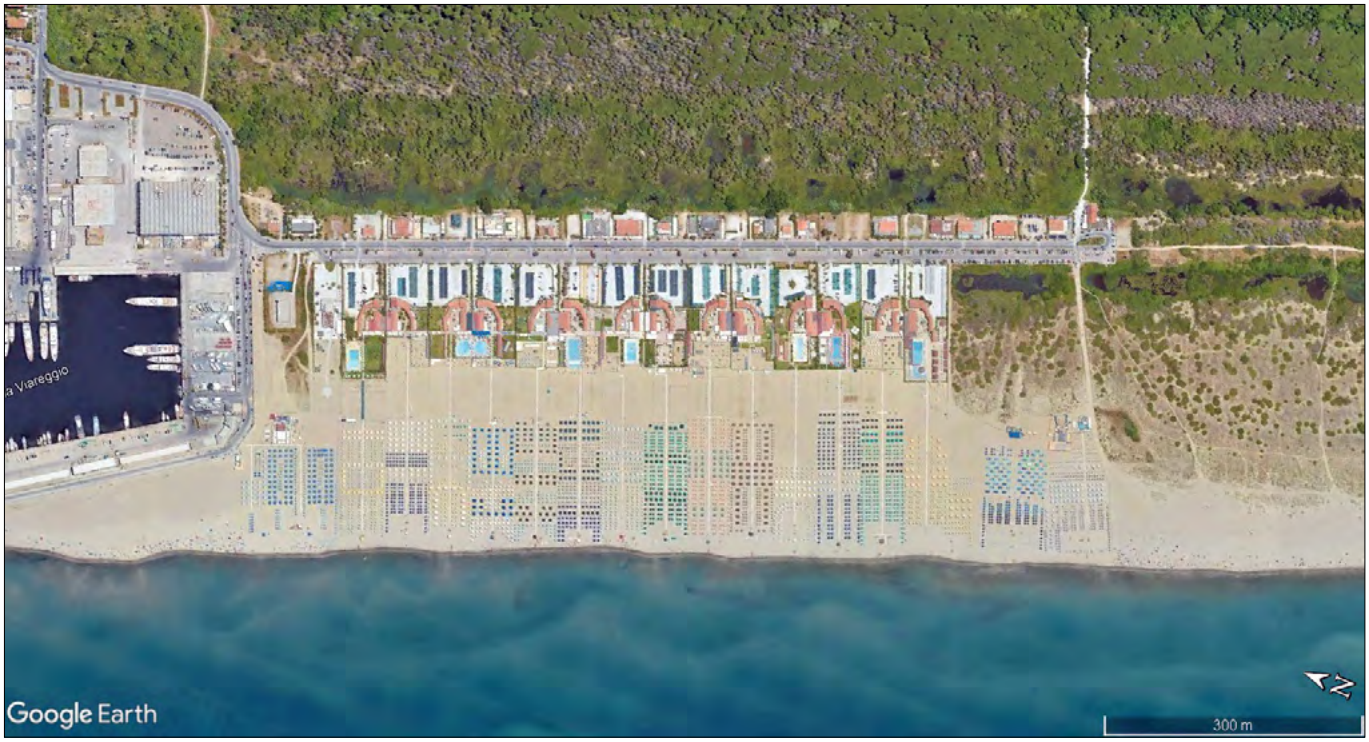


Figura 3. La spiaggia posta a sud del porto di Viareggio si è enormemente allargata grazie ai sedimenti bloccati, nel loro viaggio verso nord, dalle opere foranee, ma nella fascia intermedia non vengono montati gli ombrelloni perché troppo lontana dall'acqua.

spiaggia viene subito rimodellata dalle onde, che ne riducono la larghezza e creano una scarpata, difficilmente superabile da bambini, anziani e disabili (Fig. 4). Il ripascimento può anche modificare lo stato morfodinamico della spiaggia, trasformandola da dissipativa a riflettente e viceversa.

L'espansione di una spiaggia con ripascimento di ghiaia rende più ripido il profilo vicino a riva, concentrando così il frangimento delle onde in una zona più ristretta, cosa che potrebbe incrementare il flusso dei sedimenti lungo riva e quindi la perdita di volume.

Una forte espansione della spiaggia crea grandi aspettative nell'opinione pubblica e negli operatori economici, pur con i vantaggi che vedremo, che la associano a una futura stabilità, magari favorendo investimenti in attività

Figura 4. La spiaggia di Cavoli (Isola d'Elba), subito dopo un ripascimento con sabbia proveniente dai fondali antistanti e depositata in buona parte sulla parte emersa, presenta uno scalino che rende difficile l'accesso al mare.

destinate a fallire non appena si attua il rimodellamento del profilo. Quando viene realizzato un tale progetto, deve essere svolta un'efficace attività di comunicazione.

Il ripascimento può venire realizzato con lobi prominenti in mare (pennelli rifornitori) che vengono gradualmente erosi con una separazione dei materiali: i sedimenti più fini vengono dispersi al largo, mentre sabbia e ghiaia vengono spinti versa riva; la spiaggia viene quindi costruita dalle onde e non dai bulldozer, e acquista ben presto un profilo naturale.

LE DIMENSIONI DEI SEDIMENTI

Il ripristino ecologico della spiaggia dovrebbe utilizzare sedimenti della stessa petrografia, dimensione e classazione di quello nativo, ma molti ripascimenti servono per espandere una spiaggia esistente o per crearne una nuova, anche dove gli ambienti naturali non possono essere ricostruiti, come ad esempio nelle aree urbane. In questi casi, unitamente alla stabilità dei sedimenti, si tiene conto del gradimento degli utenti della spiaggia, e all'interno di questo tema è rilevante la loro affezione al vecchio arenile.

Senza dubbio, la sabbia medio-grossolana è quella preferita. La sabbia troppo fine rende l'acqua torbida e la spiaggia bagnata e scura; inoltre, si attacca alla pelle e vola con il vento. Troppo grossolana produce una battigia più ripida ed è difficile camminarci sopra, scomodo stendersi e impossibile la costruzione di castelli di sabbia e di piste su cui fare correre le biglie. Il valore aggiunto di una spiaggia di ciottoli è la musica delle pietre che rotolano sulla battigia e la trasparenza dell'acqua anche subito dopo una mareggiata.

Il profilo della spiaggia è influenzato dalle dimensioni dei sedimenti che, se fini danno una pendenza debole, se grossolani una più forte; quindi, a parità di volume, aumentando la granulometria si ottiene una spiaggia emersa assai più ampia rispetto a quanto si avrebbe con materiali più fini. Inoltre, la longevità del ripascimento è maggiore, non solo per il peso dei granuli, ma anche per la loro porosità e permeabilità (Fig. 5).

Dove l'intervento è finalizzato alla realizzazione di una superficie su cui svolgere attività turistico-balneari la sabbia è certamente la preferita, ma se l'obiettivo principale è quello della difesa della costa, la ghiaia è decisamente più efficace.

Un altro aspetto da valutare è la petrografia dei sedimenti di ripascimento, in particolare se si tratta di ghiaia prodotta per frantumazione: se è tenera, sia ha una forte abrasione con perdita di volume, se è troppo dura rimane spigolosa per molto tempo.

In alcuni casi sono sorti problemi con ripascimenti di sabbia prelevata offshore e ricca di frammenti di conchiglie: queste si accumulano in fasce parallele alla riva e con i loro spigoli taglienti possono causare leggere ferite ai piedi.

In ogni caso, il ripascimento della spiaggia aumenta la torbidità dell'acqua, sia che venga effettuato con inerti offshore, sia con sedimenti estratti in alveo fluviale o piane alluvionali. Anche i sassi frantumati, se non lavati ulteriormente, hanno delle particelle fini che vanno in sospensione. Il ripascimento stagionale degli arenili, effettuato per prevalenti finalità turistiche, deve essere eseguito lontano dalla stagione balneare, possibilmente in primavera, quando non ci sono più mareggiate importanti che colpiscono la riva ma le onde sono ancora in grado di ridistribuire i sedimenti in modo naturale.

IL COLORE DELLA SABBIA

Interviste fatte a persone di diversi Paesi dicono che il colore della sabbia è uno degli elementi della spiaggia che più frequentemente viene citato quando si racconta una vacanza al mare.

Lungo le coste del mondo il colore della sabbia è estremamente vario, e alcune spiagge sono conosciute più per il colore che per altre caratteristiche; questi geositi possono attrarre sia i turisti amanti della natura sia i normali bagnanti. Tale caratteristiche deve essere rispettata, anche se trovare sedimenti idonei può essere estremamente difficile e costoso.

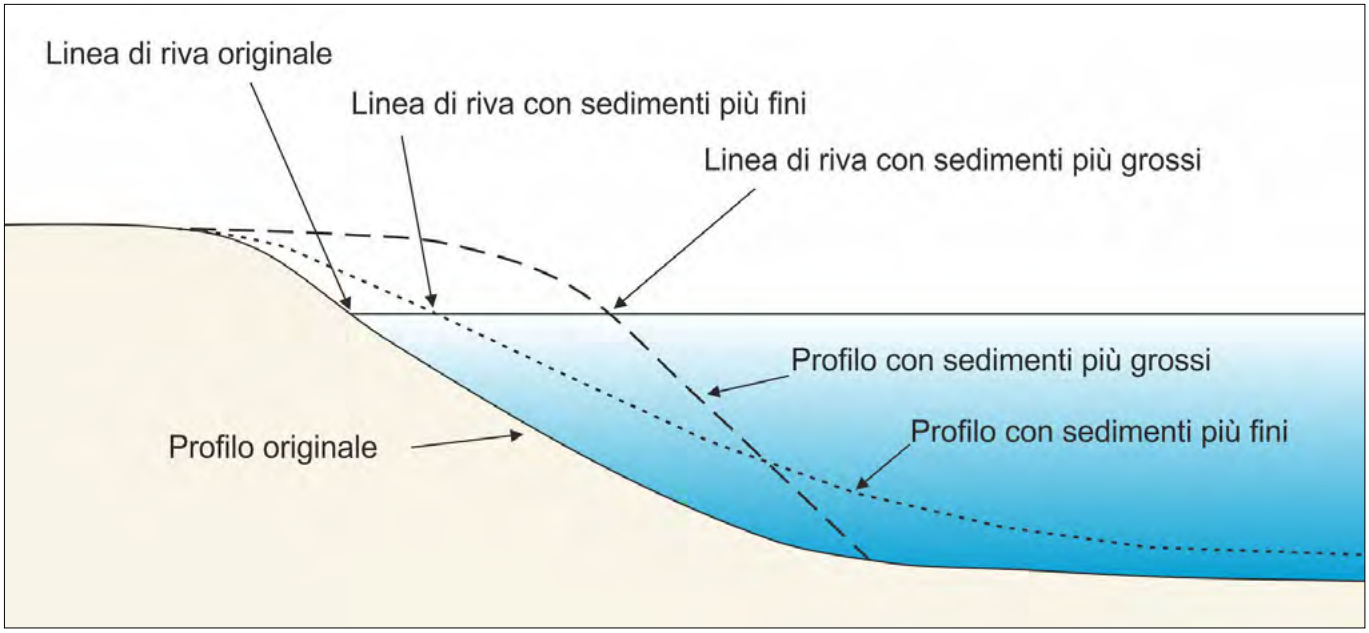


Figura 5. Evoluzione del profilo di una spiaggia, a seguito di un ripascimento artificiale, in funzione delle dimensioni dei sedimenti utilizzati.

Tuttavia, il colore della sabbia di ripascimento era considerato un problema minore nel ripascimento delle spiagge fino a quando sulla spiaggia del Poetto, a Cagliari, non furono versati sedimenti più scuri innescando forti proteste dei cagliaritani perché la "loro" spiaggia bianca era diventata grigiastra.

Trovare sedimenti compatibili dal punto di vista colorimetrico con quelli della spiaggia originale non è facile, e complessa è anche la valutazione di quanto siano diversi i colori e, più che altro, di come vengano percepiti da un osservatore.

Le Linee Guida Nazionali contro l'Erosione costiera, redatte dal Ministero dell'Ambiente e dalle Regione, suggeriscono l'utilizzazione di un determinato spazio colore (CIE L*a*b* 1976) e i limiti di accettabilità per non modificare in modo visibile il paesaggio costiero.

Particolare attenzione è necessaria quando si utilizzano materiali provenienti da zone a bassa energia, come le imboccature o i bacini portuali, dove si accumulano sedimenti fini, in quanto possono indurre torbidità dell'acqua durante e dopo il ripascimento. In questi casi si consiglia il ripascimento nella *nearshore*, per lasciare alle onde il compito di portare a terra la frazione più grossolana e al largo quella più fine.

Un rimodellamento del profilo della spiaggia, nella sua parte emersa e sommersa, può essere indotto da una mareggiata particolarmente forte anche alcuni anni dopo il versamento, rilasciando limo che può rendere torbida l'acqua nella stagione turistica.

Anche la materia organica è frequente in tali aree di deposizione; in questo caso i sedimenti sono scuri quando estratti, ma l'ossidazione li schiarisce rapidamente. Questo processo deve essere verificato prima del ripascimento, per evitare di scaricare sedimenti molto scuri per la presenza di alcuni minerali che certamente non si ossidano (Fig. 6).

Sebbene il colore della sabbia sia qui considerato solo dal punto di vista degli utenti della spiaggia, la sua importanza ecologica non può essere trascurata. L'influenza della temperatura della sabbia (correlata al colore dei sedimenti) sul rapporto tra i sessi delle tartarughe marine (Careta careta, L.) che emergono dalle uova è uno degli aspetti più studiati, ma questo parametro incide sul ciclo vitale di tutta la fauna interstiziale e sul mimetismo degli animali che frequentano la superficie della spiaggia.

COSTO E MANUTENZIONE DEL RIPASCIMENTO

Il ripascimento delle spiagge è decisamente costoso, in particolare dove vi è scarsità di materiali idonei, e se la sua funzione fosse solo quella della difesa della costa, le tradizionali scogliere, nella diversa configurazione, potrebbero essere più competitive. La sabbia da cave terrestri e le rocce hanno all'incirca lo stesso prezzo in Italia, e il volume di materiali richiesto in un progetto con strutture rigide è, per le rocce, assai inferiore!

Tuttavia, quando nell'analisi costi/benefici si considerano anche altri fattori, oltre a quello meramente economico, vince il ripascimento. Questo spiega perché molti governi e amministrazioni locali investono così tante risorse in questo tipo di strategia di protezione della costa, e gli imprenditori privati seguono lo stesso percorso, anche se su scala minore.

Figura 6. Refluimento di sedimenti depositatasi in un'area a bassa energia al riparo del porto di Marina di Campo (Isola d'Elba): la materia organica, che la rende nera, si ossida rapidamente come mostra la sabbia nel rettangolo rosso estratta il giorno precedente. Analisi colorimetriche effettuate nei giorni successivi indicano che il processo di sbiancamento si attenua velocemente.

Come per qualsiasi altro intervento di protezione della costa, è necessario eseguire il monitoraggio della spiaggia, per valutare l'efficacia del progetto, per migliorare i modelli numerici da utilizzare per progettare ulteriori ripascimenti e per definire i tempi di ricarica.

Purtroppo, l'accuratezza dei rilievi batimetrici non sempre è tale da consentire di valutare con esattezza il bilancio sedimentario di una spiaggia su scala temporale mensile e annuale, e se il materiale utilizzato, e da riutilizzare nelle ricariche, è giusto o sbagliato lo si viene a sapere quando è ormai tardi per cambiare fonte di approvvigionamento.

I risultati di questi interventi, oltre che oggetto di dibattito pubblico, vengono valutati dai ricercatori, e non tutti concordano sulla loro efficacia. In particolare, negli Stati Uniti vi sono voci critiche al riguardo, ma è indubbio che la spiaggia costituisca la base dell'economia di molti stati e di molte comunità, come in Italia, e ogni metro cubo di sabbia aggiunto alla costa può essere altamente remunerativo, anche se in breve tempo tornerà al mare. Se non ci sono danni ambientali, se i benefici sono diffusi sul territorio, e i cittadini sono consapevoli di tutte le questioni in gioco, non vi dovrebbe essere nessuna aprioristica opposizione a tale strumento di gestione, purché sia chiaro che, se si utilizza sabbia fine, è per aiutare l'economia e non per difendere il litorale.

Questo articolo è parzialmente tratto da Pranzini, E., Anfuso, G., Botero Saltaren, C. (2018), *Nourishing tourist beaches.* In *Beach Management Tools - Concepts, Methodologies and Case Studies*, Botero, Camilo M., Cervantes, Omar D., Finkl, Charles W. (Eds.), Springer, pp 293-318.

L'erosione e la difesa sostenibile del litorale toscano

The erosion and sustainable defense of the Tuscan coast

Enzo Pranzini
Università degli Studi di Firenze
Gruppo Nazionale pere la Ricerca sull'Ambiente Costiero

E-mail: enzopranzini@unifi.it

Parole chiave: erosione costiera, difesa sostenibile della costa
Key words: coastal erosion, sustainable defense of the coast

La costa toscana presenta una grande varietà di paesaggi, da tratti rocciosi con falesie a picco sul mare, come sull'Argentario e all'Isola d'Elba, a estese pianure alluvionali che terminano con delta a cuspide, come quelli dell'Arno e dell'Ombrone. Vi sono poi strette pianure costiere, talvolta orlate da dune, come nella Costa degli Etruschi, e pocket beach protette da lunghi promontori, come Baratti e le spiagge dell'Arcipelago.

Una costa sulla quale l'uomo si è insediato fin dall'antichità, tenendosi però a debita distanza dal mare per sfuggire agli attacchi di pirati e nemici, e dalle numerose aree umide, infestate dalla malaria. Ecco gli insediamenti collinari che, curiosamente, hanno spesso l'epiteto 'Marittimo' (Rosignano Marittimo, Casale Marittimo, Monteverdi marittimo, Massa Marittima, Castellina Marittima, ...), essendo, allora, gli insediamenti più protesi verso il mare.

Lo sviluppo di vie di rapida comunicazione, sia stradali che ferroviarie, la sconfitta della malaria e una relativa sicurezza militare, nonché lo sviluppo della portualità, prima, e del turismo balneare, poi, hanno determinato uno spostamento verso la riva, non solo di parte delle popolazioni prima insediatesi sulle colline, ma anche di molti abitanti delle aree più interne della regione.

È così che la fascia costiera, che a metà dell'800 era quasi completamente disabitata (e naturale!), si è riempita di insediamenti antropici e industriali, di vie di comunicazione e di strutture turistiche.

Tutto ciò avveniva proprio quando, dopo una costante crescita delle pianure costiere e dei delta fluviali, con conseguente migrazione delle spiagge verso il largo, iniziava un graduale arretramento, che è partito dalle foci dei fiumi e si è propagato su tratti di litorale sempre più estesi. Questo fa sì che molte delle spiagge che sono oggi in erosione siano di fatto più ampie di quanto non lo fossero alla fine dell'800, e se non fossero state costruite case e strade nelle superfici di recente deposizione, i problemi che oggi dobbiamo affrontare sarebbero assai minori (Fig. 1).

Le cause dell'erosione costiera sono state riconosciute nella riduzione dell'apporto solido dei fiumi, conseguente l'abbandono dell'agricoltura, nell'estrazione di inerti dagli alvei fluviali, nella costruzione di dighe e, in parte, nelle bonifiche per colmata delle paludi costiere. A queste cause, si deve aggiungere la costruzione di strutture che impediscono o limitano il trasporto litoraneo dei sedimenti, come i porti e i moli guardiani alle foci fluviali, ma anche le stesse opere di difesa costiera.

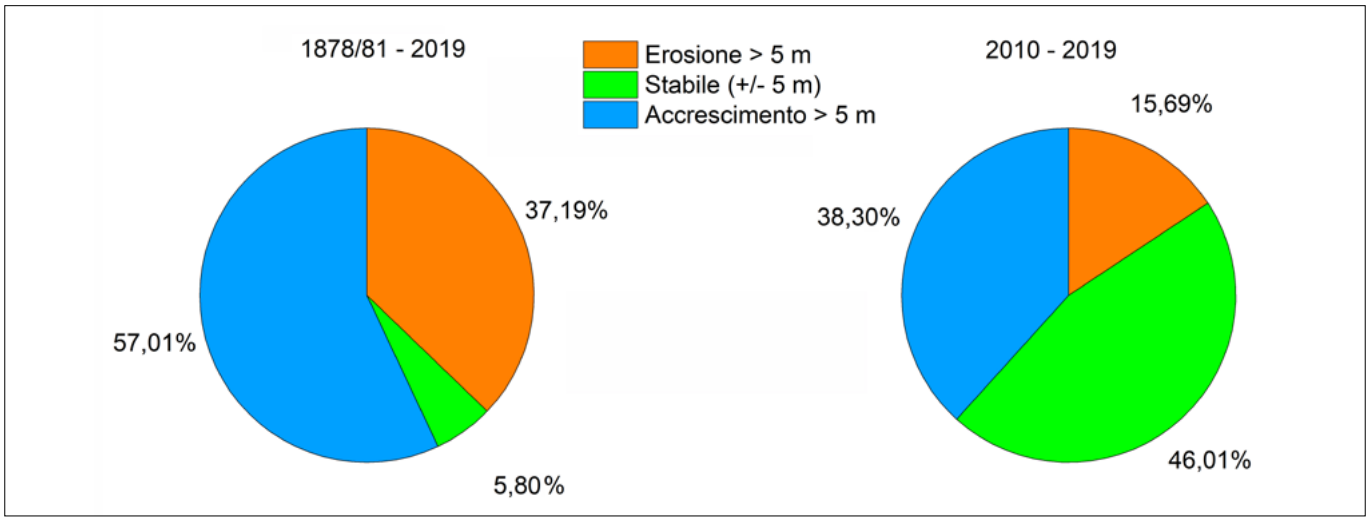


Figura 1. Stato delle spiagge toscane risultante dal confronto fra la linea di riva del 2019 e quelle del 1878-81 e del 2010. Tenendo conto che molti tratti non risultano in erosione nell'ultimo intervallo di tempo solo grazie alle opere di difesa costruite negli ultimi decenni, si può notare come in media la linea di riva di oggi sia più avanzata di quanto non lo fosse a fine '800. (dati 1881 UNIFI, 2010 RT, 2019 LaMMA; elaborazione Irene Cinelli). La maggiore percentuale di spiagge definite stabili che risulta per il periodo 2010-2019 è in parte dovuta al fatto che, restringendo il periodo di osservazione, si riduce di conseguenza la possibilità che si verifichi uno spostamento consistente della linea di riva (qui superiore a 5 metri).

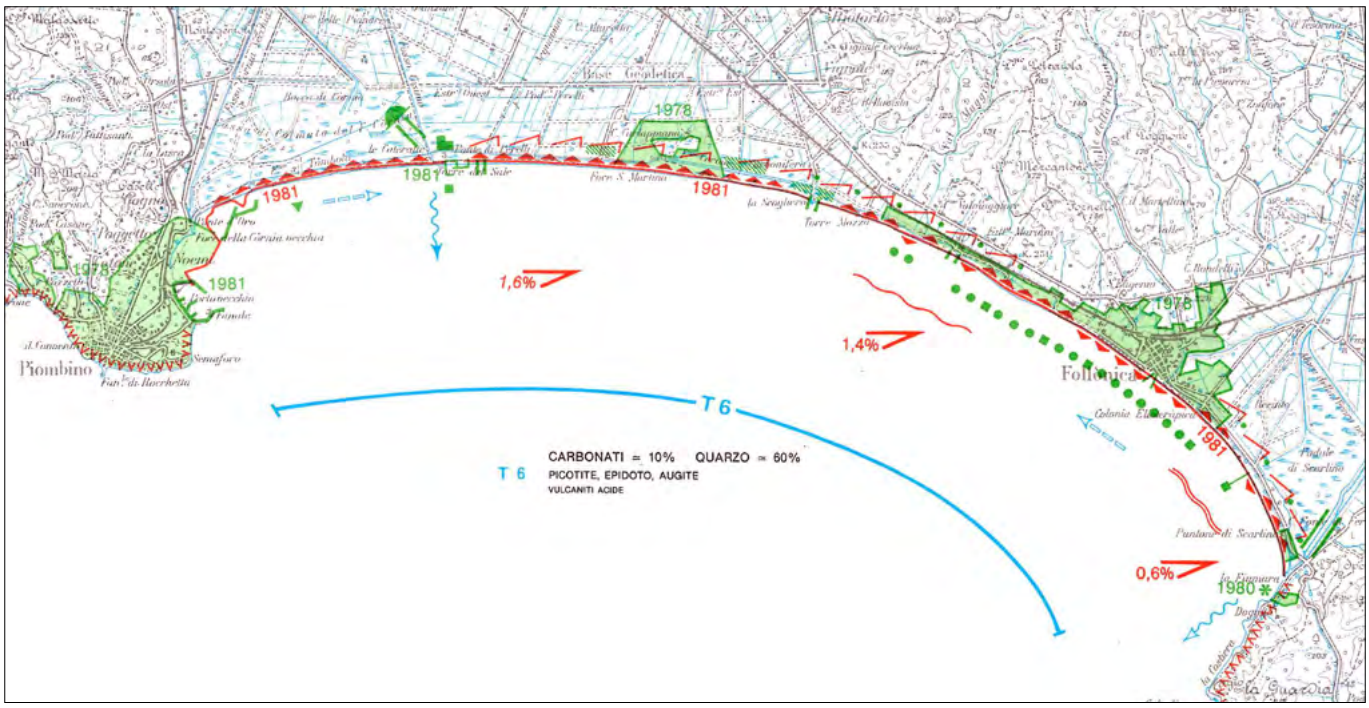


Figura 2. Stralcio del Foglio 127 'Piombino' dell'Atlante delle Spiagge Italiane, in scala 1:100.000 realizzato nell'ambito del Sottoprogetto Dinamica dei litorali, del Progetto Finalizzato C.N.R. Conservazione del suolo (SELCA, 1985).

È un processo che non ha interessato solo la Toscana, ma ha colpito, in modo più o meno forte, tutte le Regioni italiane e molti Paesi del mondo, ma, almeno a livello nazionale, questa regione presenta alcune caratteristiche e ha fatto negli anni passati particolari esperienze che l'hanno segnalata all'attenzione di ricercatori e gestori del territorio costiero, non solo italiani ma anche stranieri, che hanno visitato e studiato le nostre coste a molti paesi europei ed extraeuropei.

L'erosione della costa è stata studiata dai 'vecchi maestri' Toniolo, Mori e Albani e oggetto di convegni di rilevanza nazionale promossi anche dalle amministrazioni locali (es. Comune di Massa e Comune di Cecina), ma fu con l'avvio del 'Programma speciale Conservazione del Suolo' che le università di Bologna, Firenze, Genova, Milano e Roma iniziarono le indagini sull'Area campione Alto tirreno, compresa fra Bocca di Magra ai Monti dell'Uccellina.

Nell'Atlante delle Spiagge Italiane, prodotto nell'ambito del Sottoprogetto Dinamica dei litorali, del Progetto Finalizzato C.N.R. Conservazione del suolo, fra i primi fogli realizzati figurano proprio quelli della costa toscana (Fig. 2), e sempre su questo litorale si tenne il primo Corso di aggiornamento su "La Gestione delle aree costiere" tenuto da docenti universitari e parlamentari che avevano fatto proposte di legge su questo argomento e che venne frequentato da tecnici e amministratori di diverse Regioni italiane.

La Regione Toscana è stata la prima a dotarsi di una cartografia a grande scala (nel caso specifico 1:5.000 e nata da una simile cartografia in scala 1:10.000 della Provincia di Livorno) che mostra l'evoluzione recente della costa; documento che originariamente abbracciava il periodo 1938 - 1984 (Fig. 3), e che è stato continuamente aggiornato, prima con rilievi diretti fatti dall'Università di Firenze, poi, dal 2017, dal Consorzio LaMMA con cadenza annuale utilizzando immagini telerilevate.

Il confronto con quanto realizzato in altre Regioni italiane ed europee, favorito anche dai numerosi progetti comunitari, ha fatto crescere ulteriormente sia il mondo della ricerca sia quello delle pubbliche amministrazioni toscane.

È così che questa regione ha attratto quell'attenzione a cui si è fatto cenno in precedenza, e molti hanno mostrato interesse a quanto qui si stava sperimentando, dai pennelli sommersi alle spiagge in ghiaia, da nuove metodologie di monitoraggio costiero allo sviluppo di una cartellonistica volta a migliorare la sicurezza nella balneazione.

La pubblicazione *Back to the beach: converting seawalls into gravel beaches*, dove si indica indica un percorso di graduale ritorno dalle opere di difesa rigide, eredità di un modo di pensare alla protezione dei litorali ormai superato, a interventi morbidi, oggi possibili ma non immediatamente sostituibili alle archeostrutture che hanno trasformato le nostre coste, è citato frequentemente nella letteratura internazionale.

Con questo background, siamo pronti ad affrontare le sfide che l'innalzamento del livello del mare ci sta già proponendo? Probabilmente no, come negativa sarebbe la risposta alla stessa domanda fatta alle altre Regioni e alla gran parte dei Paesi del mondo, in particolare dove la costa non è solo l'interfaccia fra la terra e il mare, ma è anche sede di attività economiche fondamentali, come il turismo balneare.

Uno dei motivi per il quale è difficile attuare politiche di gestione dell'innalzamento del livello del mare, e degli effetti del riscaldamento globale in genere, è che i risultati si vedranno fra alcuni decenni (non solo delle azioni, ma più che altro delle non-azioni) e quindi la ricaduta politica non è stimolante per chi deve prendere oggi decisioni, di cui non si avvantaggeranno coloro che si presenteranno alle prossime elezioni.

Si dice che all'innalzamento del livello del mare si dovrà reagire con politiche 'di guerra', e quindi con limitazioni

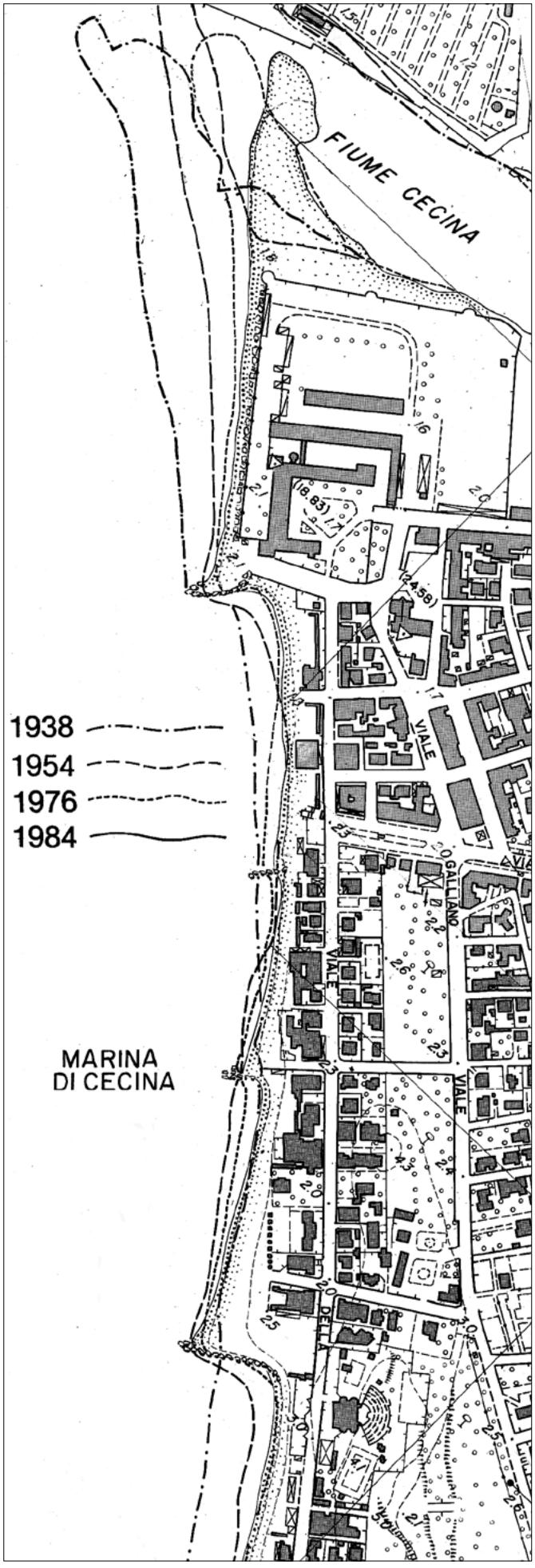


Figura 3. Stralcio della Carta dell'evoluzione della linea di riva della costa toscana (1:5.000), edita dalla Regione Toscana nel 1989.

della libertà, ma gli studi fatti su questo tema indicano che le migliori performance nel raggiungimento degli obiettivi stabiliti dagli accordi internazionali sul clima (es. Kyoto e Parigi) vengono raggiunti da quei paesi in cui vi è un elevato livello di democraticità, ed in particolare laddove vi è una democrazia partecipativa.

Ecco che le politiche e i piani di adattamento all'erosione costiera dovrebbero essere condivisi con la popolazione, e questa dovrebbe essere educata sui processi che stanno modificando la nostra costa, sulle loro ricadute ambientali, sociali ed economiche, e informati sull'evoluzione del fenomeno e sugli scenari futuri. Solo così sarà premiante il proporre politiche a vantaggio delle generazioni future, che rischiano di ricevere in eredità una costa difesa a oltranza, con l'impossibilità di tornare indietro e prendere una strada più sostenibile.

In Toscana, come in moltissime altre parti del mondo, la risposta al mare che avanza, sia per il deficit sedimentario, sia per l'innalzamento del livello del mare, consiste nella costruzione di opere che tendono a ridurre l'energia delle onde che colpiscono la costa o ad intercettare i sedimenti in transito, rubandoli alle spiagge adiacenti. A queste metodologie si affiancano spesso, o vanno in sostituzione, i ripascimenti artificiali, con sedimenti prelevati in cave a terra, in depositi costieri (es. dove vengono intercettati dai porti) o sulla piattaforma continentale.

Si tratta di una risorsa finita e per il cui accaparramento è in corso una specie di guerra, con un ruolo determinante giocato dalle organizzazioni criminali, tanto che il commercio illegale della sabbia è il terzo per importanza nel mondo, dopo quello della droga e della contraffazione. La Banca Mondiale ha stimato che le coste oggetto di ripascimento artificiale passeranno dal 3% del 2000 al 18-33% nel 2100, cosa che renderà sempre più rara e costosa la sabbia.

Dobbiamo anche tener conto del fatto che sui fondali dei nostri mari, anche per le giuste limitazioni di tipo ambientale, le risorse sono assai più limitate di quelle di paesi che possono farsi vanto di strategie 'building with nature'.

Ma anche se avessimo le risorse di sabbia ed economiche per contrastare il mare che avanza con continui ripascimenti artificiali, dovremo fare i conti con l'innalzamento di quello che, in geomorfologia, si definisce il livello di base, ossia quello con il quale si raccorda il sistema fluviale.

I fiumi dovranno entrare in mare ad una quota maggiore, e sarà necessario innalzare tutti gli argini per impedire lo straripamento nelle pianure costiere; inoltre, tutto il sistema idraulico artificiale (canali di bonifica, scarichi urbani e industriali) dovrà essere adeguato. Ma se i fiumi non potranno innalzare le pianure costiere depositandovi i sedimenti, come hanno fatto per millenni, noi avremo dei territori più bassi del livello del mare, come in Olanda, ma non avremo la possibilità di sviluppare per tempo quella rete di dighe e argini (per una lunghezza totale di 22.000 km), quel sistema di barriere mobili (tipo MOSE) e quella elevazione del terreno che lì è stato sviluppato nei secoli passati.

La Politica deve assumersi le proprie responsabilità e identificare, con il supporto dei tecnici, quali tratti di lito-

Figura 4. La spiaggia di Marina di Massa è una delle più difese della costa toscana, con circa 2 km di scogliere (pennelli e parallele soffolte) per ogni kilometro di litorale. L'innalzamento del livello del mare obbligherà alla realizzazione di strutture ancor più pesanti se si vorrà mantenere la spiaggia, che potrebbe essere anche alimentata con sedimenti più grossolani. Il retroterra con scarsa elevazione costituirà comunque un problema che richiederà progettazioni innovative e grandi investimenti.

rale vadano difesi ad oltranza, con investimenti progressivamente crescenti, e quali tratti è preferibile lasciare arretrare, anche nell'interesse delle generazioni future.

Arretrare non significa abbandonare: qui sarà necessario sviluppare delle azioni che consentano alle popolazioni residenti una qualità della vita uguale, se non migliore, di quella attuale, e saranno richiesti sforzi non solo economici ma anche di grade progettualità.

Laddove si è consolidata un'attività economica basata sulla spiaggia sarà necessario mantenerla, ma ciò avrà dei costi estremamente elevati e in alcuni casi si dovranno inventare nuove modalità per vivere la costa. È evidente che non si può immaginare di sostituire il turismo balneare di Forte dei Marmi con una acciaieria, così come i water front delle città portuali dovranno essere completamente rivisti, con innalzamento delle superfici e, forse, l'impermeabilizzazione dei piani bassi degli edifici (Fig. 4).

Oltre a ciò, e anzi ancor prima, è indispensabile definire le linee di *set back*, ossia quelle oltre le quali non si può costruire più niente e dove si dovrebbe iniziare la delocalizzazione di quanto presente.

Questa linea dovrebbe essere definita sulla base di indagini dettagliate per ogni area e non posta ad una distanza fissa 'burocratica' dalla riva attuale. Si dovrà tener conto della morfologia del terreno, dall'esposizione al moto ondoso, del rischio di alluvione e della presenza o meno di infrastrutture e della loro importanza almeno a livello regionale.

Una località si propone come terreno di sfida per la gestione degli effetti dell'innalzamento del livello del mare, ed è Marina di Pisa. Inopportunamente costruita sul lobo meridionale delta dell'Arno negli stessi anni in cui cominciava l'erosione del litorale, è stata difesa con pennelli, scogliere radenti, parallele e pennelli sino agli ultimi ripascimenti con ghiaia, concepiti seguendo l'idea del *Back to the beach* a cui si è fatto cenno in precedenza. Ciò ha portato ad abbassare sotto il livello del mare alcune scogliere parallele emerse e di realizzare una spiaggia, seppur in ghiaia. L'intervento è oggetto di discussione fra i contrari e i favorevoli, ma è certo che ha salvato la viabilità litoranea e ha fornito una superficie su cui prendere il sole anche se, in quanto opera di difesa, non dovrebbe essere data in concessione. Ma è altrettanto certo che non sarà questa configurazione a salvare Marina di Pisa, che oggi si trova su di un promontorio sabbioso aggettante in mare per l'erosione di oltre 1.3 km del lobo deltizio settentrionale, e per di più in un'area soggetta a una subsidenza di circa un centimetro all'anno (Fig. 5).

Figura 5. In alcuni tratti del litorale di Marina di Pisa, difeso da una scogliera aderente, dieci frangiflutti paralleli e da alcuni pennelli, le scogliere esterne sono state abbassate sotto il livello del mare e l'energia delle onde che le superano viene assorbita da una spiaggia in ghiaia.

Figura 6. Una difesa in scogli naturali costruita da un privato a nord di Bocca d'Ombrone, nel Parco Regionale della Maremma, per la difesa della propria abitazione. Non sarebbe stato meglio fare arretrare la casa, che è l'unica presente in questo tratto di costa?

Alcuni scenari di innalzamento del livello del mare, sui quali sono impostate strategie di adattamento di Paesi che prestano maggiore attenzione al fenomeno, considerano anche valori di 2,5 metri; non raggiungibili con certezza, ma assolutamente da non da escludere. E quando si fa un'analisi del rischio, anche gli eventi meno probabili, ma più catastrofici, devono essere considerati, se il bene esposto ha un grande valore. E quale è il valore di Marina di Pisa e dei suoi abitanti?

Vi sono poi aree non urbanizzate, o con insediamenti sparsi, dove, un'analisi su lungo periodo potrebbe dimostrare come un arretramento strategico sia più conveniente, dal punto di vista economico e ambientale, che non una caparbia difesa, come è risultato in alcuni paesi in cui tale analisi è stata condotta.

Le spiagge poste alla foce dell'Arno e dell'Ombrone, nei parchi regionali Migliarino - San Rossore-Massaciuccoli e della Maremma, potranno arretrare mantenendo un ambiente naturale o dovranno essere trasformate in coste rocciose? (Fig. 6).

In entrambi i parchi la difesa costiera è funzionale anche alla conservazione delle aree umide retrostanti, ma con l'innalzamento del livello del mare, in zone in cui anche la subsidenza gioca a nostro sfavore, quello che certo non mancherà sono proprio le aree umide.

Inoltre, l'erosione di alcuni tratti costieri consente la stabilità, o la minore erosione, di altre spiagge, e proteggendo le prime si penalizzano le seconde. La difesa del litorale posto a sud di Marina di Cecina, in forte erosione, priverà la spiaggia di Marina di Bibbona, e poi di Marina di Castagneto, di un apporto sedimentario che già ora sostituisce in parte quello non più fornito dal Fiume Cecina. Non è facile trovare un compromesso fra esigenze così diverse, che si esplicano su tratti costieri differenti ma adiacenti, come in questo caso quelli naturali e quelli antropizzati. È per questo che è necessario avere una strategia di lungo periodo e un'ampia condivisione delle scelte (Fig. 7).

Figura 7. L'erosione della spiaggia e della duna a sud di Marina di Cecina contribuisce all'alimentazione delle spiagge di Marina di Bibbona e Marina di Castagneto, supplendo in parte alla riduzione dell'apporto sedimentario del Fiume Cecina. È prioritaria la stabilizzazione di questo tratto, di grande valore naturalistico, o la tutela dei settori di rilevante valore economico?

Un forte impegno delle Regioni, come anche di quella Toscana, è posto nei ripascimenti artificiali sia come difesa dall'erosione sia come supporto all'economia della spiaggia. Talvolta, ciò viene fatto con sedimenti le cui dimensioni sono inferiori a quelle della sabbia nativa, cosa che determina una limitata longevità dell'intervento. Questo è motivato dal minore costo dei sedimenti dragati in prossimità della riva, a ridosso dei porti, o anche sui fondali, rispetto a quello dei materiali più grossolani, e quindi più stabili,

Figura 8. Ripascimento del litorale di Marina di Massa con sedimenti dragati nella *nearshore* e scaricati con la tecnica *rainbow*.

provenienti da cave terrestri più lontane, che comunque determinerebbero un maggior impatto ambientale (Fig. 8).

In certi casi, si utiltizzano risorse che potrebbero essere destinate ad interventi più duraturi, ovviamente impossibili da realizzare su tutti i tratti di litorale che li richiedono, ma che dovrebbero essere definiti sulla base delle necessità e con una visione del problema sul lungo termine.

In realtà quella Toscana è una delle poche Regioni italiane che hanno un Piano per la difesa della costa di più lunga prospettiva, che, in questo caso, si sovrappone a quello di interventi stagionali, ma non viene analizzata, se non con un breve cenno, la possibilità di arretramenti strategici. Altre Regioni non contemplano neppure questa vaga possibilità, ma forse l'esperienza maturata dalla Regione Toscana potrebbe consentire obiettivi più ambiziosi!

Uno degli effetti dell'innalzamento del livello del mare si ritiene che consista in un analogo sollevamento dei fondali fino alla profondità di chiusura (sulla costa toscana circa 8 m; Regola di Bruun) e se i fiumi non porteranno questi materiali, le onde li prenderanno dalla spiaggia e dal terreno retrostante. Questo aspetto è stato spesso ignorato, attribuendo le cause dell'erosione alla sola riduzione dell'input sedimentario dei fiumi, ma se consideriamo un innalzamento del livello del mare di soli 20 cm (valore minimo delle stime globali), quale c'è stato dal periodo preindustriale ad oggi, ed una profondità di chiusura distante un kilometro da riva, abbiamo una perdita di 200 metri cubi di sabia (circa 10 camion) per metro di costa. Forse questo non si è ancora manifestato nella sua completezza, perché la risposta del fondale non è immediata, ma questo volume verrà raggiunto anche se il livello del mare smettesse d'innalzarsi oggi stesso. E quanta sabbia sarà necessaria per compensare un innalzamento di 'solo' un metro?

La domanda che dovremmo porci, prima di impostare un qualsiasi piano di gestione della fascia costiera, è: come sarà la costa toscana nel 2050, ... nel 2080, ... nel 2100, ...? Senza questa visione non sarà possibile definire obiettivi e strategie, quantificare l'impegno richiesto e indirizzare le risorse laddove non andranno disperse.

E, successivamente, cosa sarà meglio fare per rispondere alle esigenze attuali delle popolazioni che vi risiedono, senza compromettere la qualità della vita (e dell'ambiente) di quelli che verranno dopo di loro?

Erosione costiera - Considerazioni su una pocket beach nel Golfo di Cagliari - Genna 'e Mari

Coastal erosion – Considerations about a pocket beach in the Gulf of Cagliari - Genna 'e Mari

Andrea Serreli
Geologo PhD, libero professionista

E-mail: andrea.serreli@libero.it

Parole chiave: piccola spiaggia, bilancio sedimentario, erosione costiera, unità geomorfologica
Key words: pocket beach, sedimentary budget, coastal erosion, geomorphological unit

PREMESSA E INQUADRAMENTO

La piccola spiaggia di Genna 'e Mari è ubicata nella Sardegna meridionale, nella Città metropolitana di Cagliari, nel territorio del Comune di Sinnai (Fig. 1).

Figura 1. Inquadramento generale e di dettaglio dell'area di studio.

La spiaggia si trova sul bordo orientale del Golfo di Cagliari, in un settore costiero esposto ai quadranti meridionali individuabile tra il promontorio di Capo Boi a Est ed il promontorio di Punta Monte Ferugo a Ovest; il territorio costiero è complesso, conformato in baie e promontori, sotteso da bacini idrografici di varia dimensione, caratterizzato dall'alternanza di spiagge sabbiose nelle baie più profonde, spiagge ciottolose lungo le coste più esposte, coste rocciose alte e coste rocciose basse (Fig. 2).

Sulla costa versano diversi bacini idrografici tra i quali il più importante per dimensioni e caratteristiche morfologiche è quello del Rio Solanas, questo corso d'acqua, a regime torrentizio, si immette in mare nel settore orientale della spiaggia di Solanas; un altro piccolo bacino caratterizza la zona di Portu Perdosu, con il Canale di Portu Perdosu che si immette in mare nel settore orientale dell'omonima spiaggia; la spiaggia di Genna 'e Mari è invece sottesa da un piccolo bacino idrografico che non si contraddistingue per la presenza di un proprio corso d'acqua, ma piuttosto per la presenza di versanti costieri interessati dall'intensa antropizzazione iniziata a partire dalla fine degli anni '50. Altri bacini costieri di piccole dimensioni sottendono il settore di costa rocciosa bassa presso Punta Cabudi e il settore di costa rocciosa alta di Cala Pisanu.

In generale le caratteristiche morfometriche, geomorfologiche, geo-idrologiche e idrogeologiche dei bacini idrografici che sottendono il territorio prospiciente il mare, attraverso l'azione di trasporto solido dei corsi d'acqua, forniscono detriti alle aree costiere e determinano lo stato ed i processi evolutivi del litorale in modo molto sensibile. Infatti, il dinamismo e l'evoluzione di un sistema complesso come quello di una spiaggia, emersa e sommersa, della

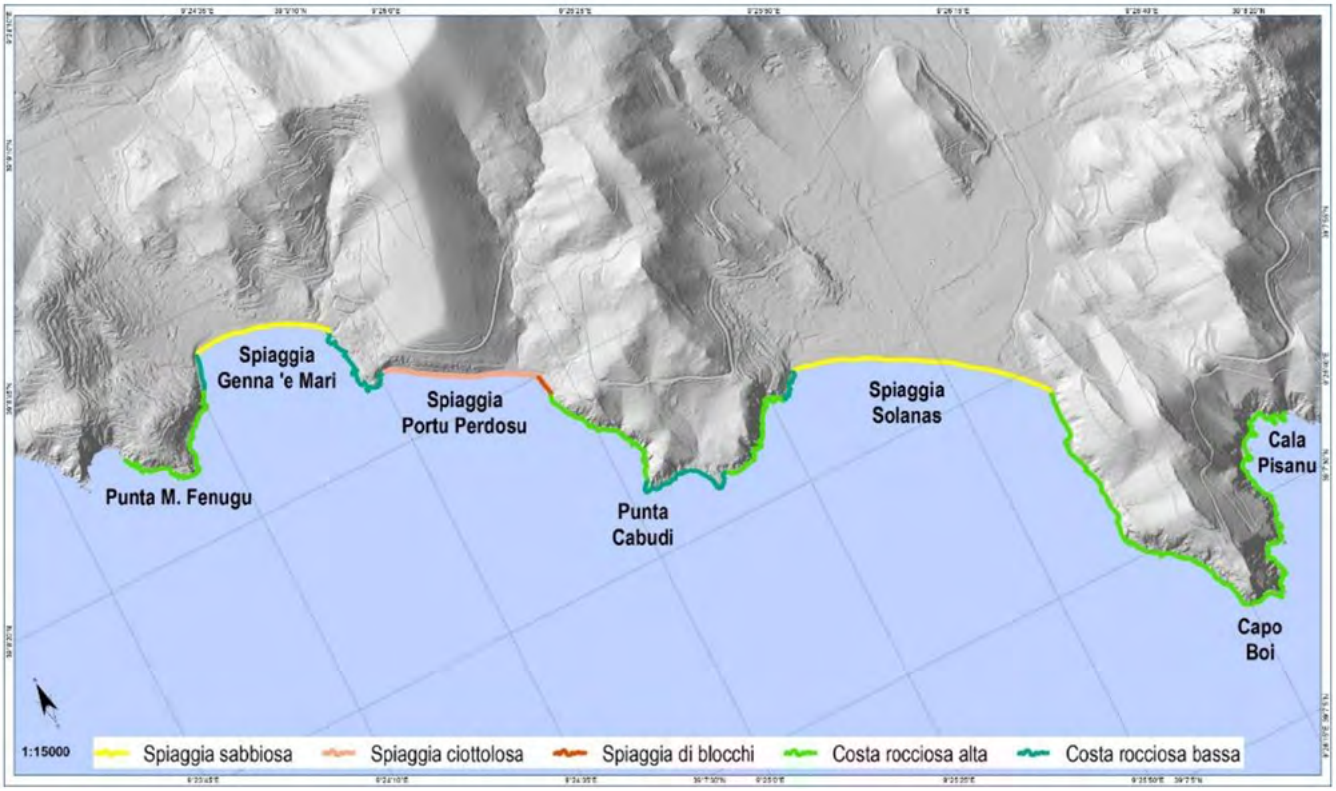


FIGURA 2. Morfotipi costieri del tratto di litorale in cui si inserisce la spiaggia di Genna 'e Mari.

duna e del retroduna, sono strettamente interconnessi con il dinamismo e l'evoluzione dei corsi d'acqua che sfociano in mare, perchè è da questi che dipende la principale fonte di alimentazione dei bilanci sedimentari costieri (Fig. 3).

FIGURA 3. Bacini idrografici afferenti al tratto di litorale in cui si inserisce la spiaggia di Genna è Mari.

È pertanto opportuno che gli studi geo-ambientali destinati a valutare lo stato di una spiaggia debbano essere estesi ad unità geomorfologiche, in ambiente emerso e sommerso, delle quali è importante conoscere la storia evolutiva; perché un'alterazione occorsa nel passato potrebbe mostrare le conseguenze anche dopo decine di anni e determinare le dinamiche geomorfologiche attuali anche in maniera irreversibile (Fig. 4).

Nello specifico caso in esame le alterazioni al complesso geo-ambientale, avvenute negli anni passati, hanno modificato intensamente la dinamica evolutiva del sistema litorale ed in particolare hanno modificato pesantemente il bilancio sedimentario della spiaggia di Genna 'e Mari. Le modifiche apportate all'unità geomorfologica hanno cambiato il regime morfo-sedimentario della *pocket beach*, rendendo la spiaggia molto vulnerabile conseguentemente al depauperamento dei volumi sabbiosi e delle pesanti antropizzazioni delle aree di retro spiaggia che hanno indotto una dinamica erosiva, regressiva ancora attiva.

L'esempio della spiaggia di fondo baia di Genna 'e Mari offre uno spunto di riflessione sul fenomeno dell'erosione costiera e su come questo sia stato innescato e accelerato dalla antropizzazione dei territori, con uno sguardo al passato e tanta incertezza nell'evoluzione futura.

Attraverso una ricostruzione storica e una personale e pluridecennale conoscenza, maturata a seguito di numerose osservazioni dei fenomeni geomorfologici che hanno interessato l'area costiera emersa e sommersa, in questo articolo si cerca di rispondere ad una serie di quesiti che sono alla base dell'analisi delle fenomenologie e degli effetti osservati, partendo dall'assunto che il sistema della *pocket beach* è in uno stato evidente di erosione, come d'altronde messo in evidenza nel Programma Azione Coste della Regione Sardegna (2013) dove la spiaggia di Genna 'e Mari è annoverata tra le spiagge ad elevata criticità connessa sostanzialmente alla totale mancanza di apporti sedimentari ed alla forte pressione antropica e quindi per essa risulta necessaria l'at-

FIGURA 4. Dettaglio del bacino idrografico dell'Unità geomorfologica di Genna 'e Mari.

tenta azione di monitoraggio dei processi evolutivi e la regolamentazione della frequentazione.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

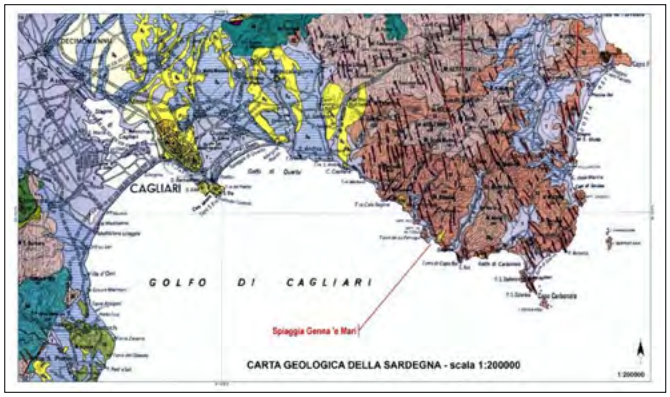


Figura 5. Stralcio della Carta geologica della Sardegna in scala 1:200000.

Il territorio costiero si caratterizza geologicamente per i diffusi affioramenti delle rocce del basamento cristallino paleozoico, in particolare si tratta di litologie appartenenti al Complesso granitoide del Sarrabus e più specificatamente all'Unità intrusiva di Geremeas.

Tra i vali litotipi intrusivi si distinguono: granodioriti, granodioriti monzogranitiche, leucograniti e masse gabbriche; il complesso plutonico granitoide è intruso da rocce magmatiche differenziate con giacitura filoniana ed in ammassi.

Le litologie granitoidi dell'Unità intrusiva di Geremeas e le litologie appartenenti al Corteo Filoniano sono state messe in posto nella fase terminale dell'Orogenesi Ercinica (Carbonifero Sup. - Permiano) ed in particolare durante la fase distensiva della catena quando il collasso della stessa e lo sviluppo di faglie e fratture ha consentito la risalita di magmi lungo tali vie preferenziali.

Questi magmi tardo ercinici hanno generato un sistema di filoni acidi e basici, appartenenti al Corteo Filoniano, prevalentemente orientati NO – SE, che caratterizzano il paesaggio costiero del Sarrabus nella Sardegna meridionale e orientale e nella fattispecie del territorio costiero studiato.

Nel territorio litoraneo e fino alla linea di costa affiorano depositi conglomeratici, grossolani ed eterometrici, appartenenti alla Formazione di Ussana (Oligocene Sup. – Aquitaniano Inf.). Questi conglomerati affiorano diffusamente in località Serra Cazzola, in un settore di cresta di displuvio che si allunga fino alla costa, caratterizzando la litologia del versante costiero, della ripa di erosione marina, del retro spiaggia e del basamento della spiaggia emersa e sommersa di Portu Perdosu. Si tratta di un deposito sedimentario di origine alluvionale costituito da materiali eterometrici ed eterogenei, generati dal disfacimento del basamento granitoide, con fuso granulometrico molto variabile, blocchi, massi, ciottoli e ghiaie, immersi in una matrice inglobante sabbioso limosa, addensati e localmente cementati.

All'interno e intercalati si possono riconoscere paleosuoli o lenti e strati di sedimenti sabbiosi, di depositi colluviali, di fondo alveo e di versante, stratificati e disposti in paleomorfologie legate alla dinamica dei deflussi superficiali (Fig. 6).

ANALISI STORICA

Il territorio costiero esaminato fino alla fine degli anni '50 manteneva condizioni di elevata naturalità, con rarissimi interventi antropici e un ordinario equilibrio geomorfologico, in particolare per quanto riguarda la fascia litorale

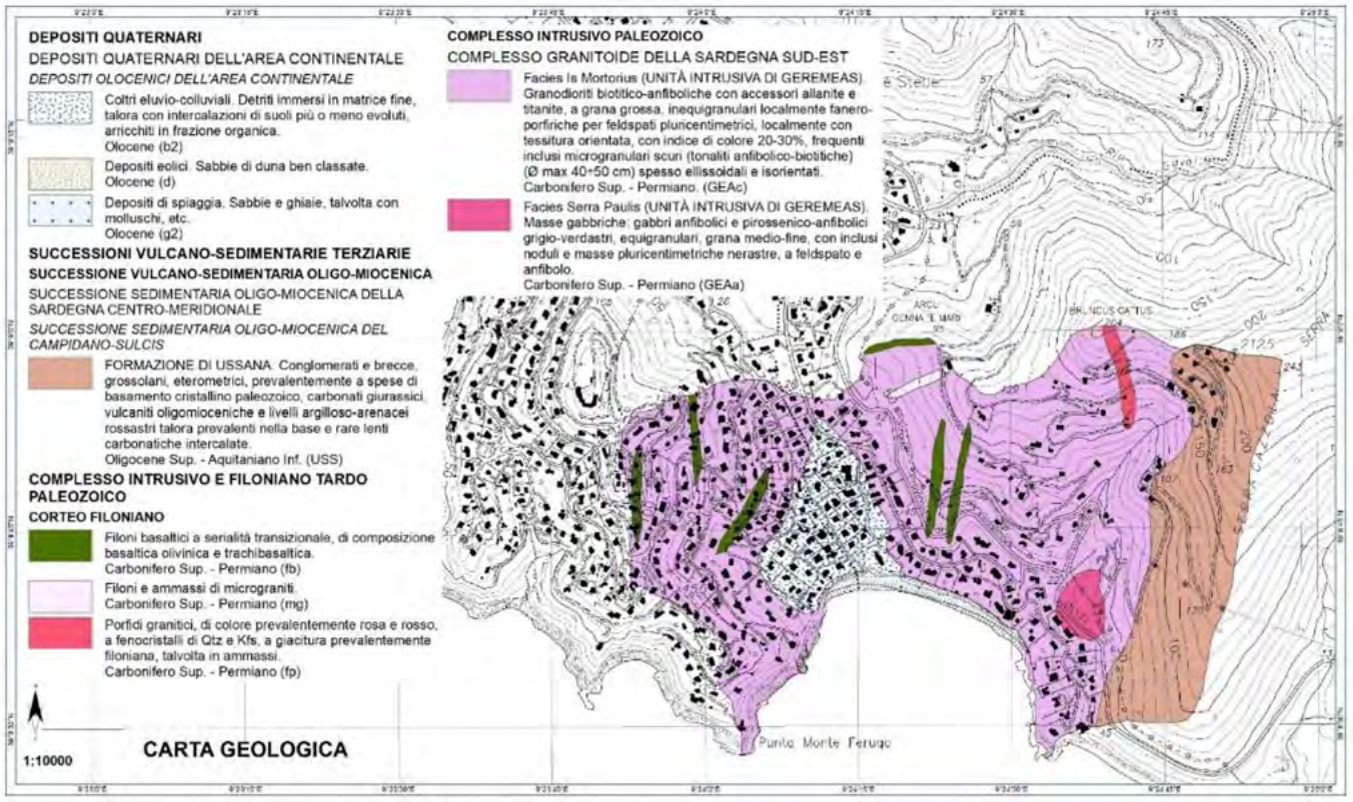


Figura 6. Carta geologica in scala 1:10000 del bacino idrografico dell'Unità geomorfologica di Genna 'e Mari.

che in quegli anni rivestiva un modesto interesse sociale; a partire dai primi anni '60 iniziano le grandi trasformazioni che hanno segnato il territorio costiero con l'impronta che mostra ancora oggi.

L'analisi storica basata su cartografia, aerofotografia, ricerca di testimonianze e osservazioni multitemporali, riveste un ruolo determinante nello studio geomorfologico, per ricercare l'origine dei processi e dare risposte molteplici agli andamenti che si osservano attualmente, ma anche per affinare campagne di indagini e misurazioni dei fenomeni oltre che per trovare strategie di intervento.

Nella Figura 7 si osserva la drastica trasformazione del territorio in esame avvenuta in poco più di 60 anni tra un paesaggio ad elevata connotazione naturale ed un paesaggio urbanizzato ed in costante urbanizzazione.

Nella Figura 8 si osserva un territorio intatto, percorso da una mulattiera che passava il Salto di Genna 'e Mari (Porta verso il Mare) attraverso uno spazio rappresentato con la simbologia puntinata che indica la presenza di sabbie.

Nella Figura 9 si osserva che il territorio inizia ad essere interessato da una infrastruttura stradale importante, attuale S.P. 17 e da ramificazioni locali di penetrazione, ma la puntinatura che indica le sabbie è ancora diffusa.

Nella Figura 10 si osserva un territorio ancora poco trasformato, ma la campitura puntinata che indica le sabbie è fortemente ridotta ed in particolar modo sul versante di Genna 'e Mari.

Le testimonianze raccontano che decine di autocarri tra la fine degli anni '50 e negli anni '60 ogni giorno caricavano sabbie dalle dune e dalle spiagge di Cannesisa e di Genna 'e Mari, azione che si svolgeva normalmente depredando anche i lidi vicini, ma raccontano anche di navi draga che prelevavano sedimenti dai fonali marini antistanti gli stessi lidi.

Ciò che è accaduto in poche decine di anni è una trasformazione pesantissima per un sistema geomorfologico, estremamente vulnerabile come una *pocket beach*, che si reggeva sul delicato equilibrio del flusso dei sedimenti di duna.

Figura 7. Confronto tra ortofoto degli anni '50 e dei tempi attuali.

Figura 8. Stralcio Carta d'Italia IGM 1:25000 – 1885.

Figura 9. Stralcio Carta d'Italia IGM 1:25000 – 1931.

Figura 10. Stralcio Tavoletta 234 II NE IGM serie 25V 1960 – 1961.

Nella Figura 11 si osserva chiaramente che nel giro di una quindicina di anni il territorio ha assunto un aspetto completamente diverso; la forte connotazione naturale e di elevato pregio paesaggistico ha lasciato posto ad un territorio antropizzato, che di fatto ha cancellato la duna, conquistandone gli spazi e alterando irreversibilmente la dinamica geomorfologica di insieme.

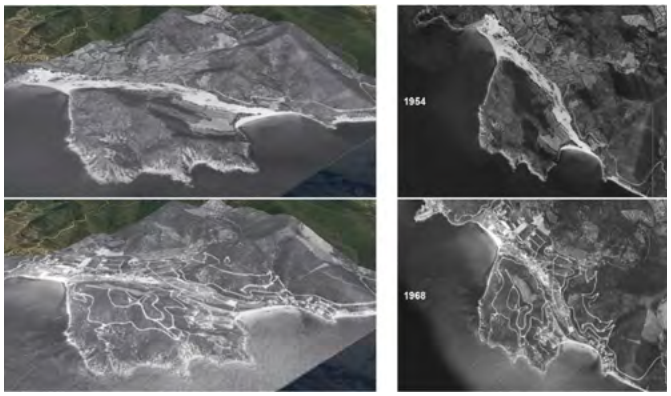


Figura 11: Confronto tra immagini tridimensionalizzate e ortofoto – 1954 vs 1968.

L'effetto stravolgente conseguente alla asportazione delle sabbie di duna e alla conseguente urbanizzazione del sistema ha determinato la modifica irreversibile dell'unità geomorfologica da cui dipendeva la dinamica morfosedimentaria ed evolutiva della spiaggia. L'unità geomorfologica originaria è stata di fatto divisa in due unità ormai indipendenti l'una dall'altra, le quali per forza di cose presentano oggi modelli evolutivi differenti (Fig. 12).

La ricostruzione storica conduce a dedurre che la spiaggia di Genna 'e Mari altro non era che il "retroduna" di un antico sistema di trasporto e sedimentazione eolica, allungato tra la spiaggia di Cannesisa e quella di Genna 'e Mari, orientato NW-SE e con predominante trasporto verso SE, che fino ai primi anni '50 del secolo scorso, ovvero prima che le sabbie venissero meccanicamente asportate ed i territori venissero conquistati dall'uomo, costituiva la principale fonte di alimentazione sedimentaria della *pocket beach*.

Questa tesi è supportata e validata da correlazioni interpretative e da studi sedimentologici (Progetto Maregot – parternariato dalla Regione Sardegna); infatti emerge che tra i sedimenti sabbiosi della spiaggia di Cannesisa e quelli di Genna 'e Mari, del tutto identici da un punto di vista minero-petrografico, l'unica differenza è nella granulometria, che vede quelli della spiaggia di Genna 'e Mari molto più fini, appunto come lo sono i sedimenti eolici.

La conoscenza le testimonianze e le osservazioni dirette, eseguite negli ultimi 50 anni, confermano che questa differenza fino a qualche anno fa era evidentissima, ovvero prima che i processi erosivi di mare e soprattutto di monte interessassero la spiaggia residuale, con profilo a basso declivio e dinamica dissipativa che oggi ha lasciato spazio ad una spiaggia sommersa profonda ed a una dinamica riflessiva.

STATO ATTUALE

Le modifiche apportate all'unità geomorfologica, il conseguente depauperamento dei volumi sabbiosi e la diffusa antropizzazione delle aree di retro spiaggia e delle unità geomorfologiche, ancora in atto, hanno indotto una dinamica erosiva con pesanti conseguenze per la spiaggia di Genna 'e Mari, ma anche per quella di Cannesisa.

Le conseguenze del processo erosivo sono molteplici e sono osservabili in un arretramento sensibile della linea di costa sabbiosa, che rappresenta un segnale non necessariamente da associare a processi erosivi, in quanto il complesso equilibrio di una spiaggia si basa sul rapporto e lo scambio volumetrico che si instaura tra la parete sommersa, la parte emersa e la duna di retrospiaggia, definendo morfologie e processi sedimentari dinamici.

Il confronto tra la Figura 15 e la Figura 16 mostra l'arretramento della linea di costa sabbiosa, ma anche la riduzione pressoché totale della duna e un forte decremento volu-

Figura 12: Cannesisa – Genna 'e Mari, a sx l'unità geomorfologica olocenica, a dx le unità geomorfologiche "antropoceniche".

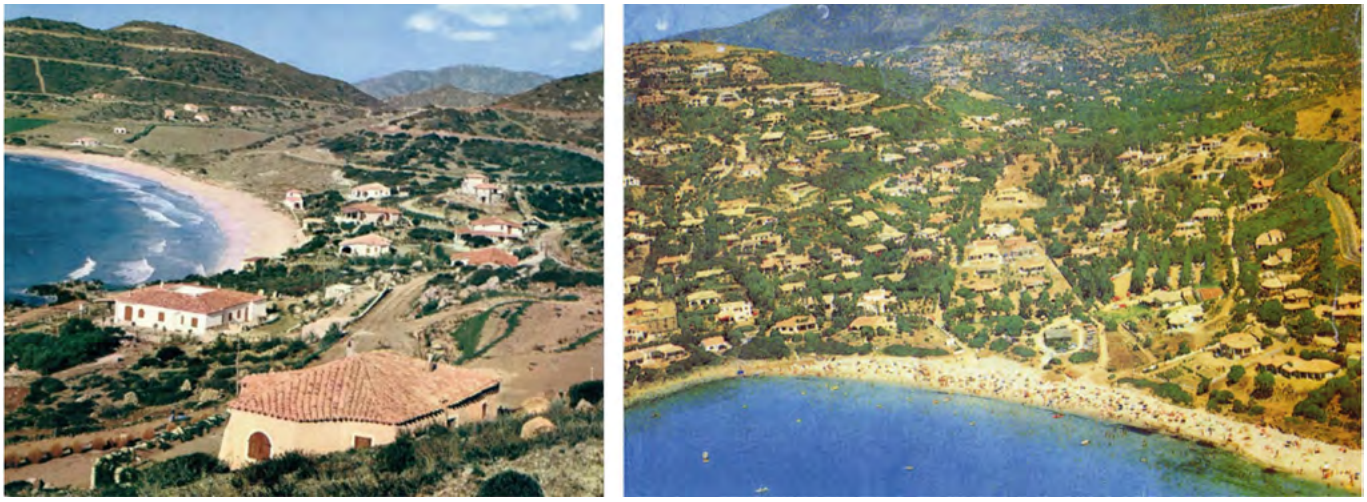


Figura 13. Genna 'e Mari, a sx alla fine degli anni '60 (1967 / 1968) a dx inizio anni '80 (1980 / 1981) immagini tratte da https://torredellestelle.wordpress.com

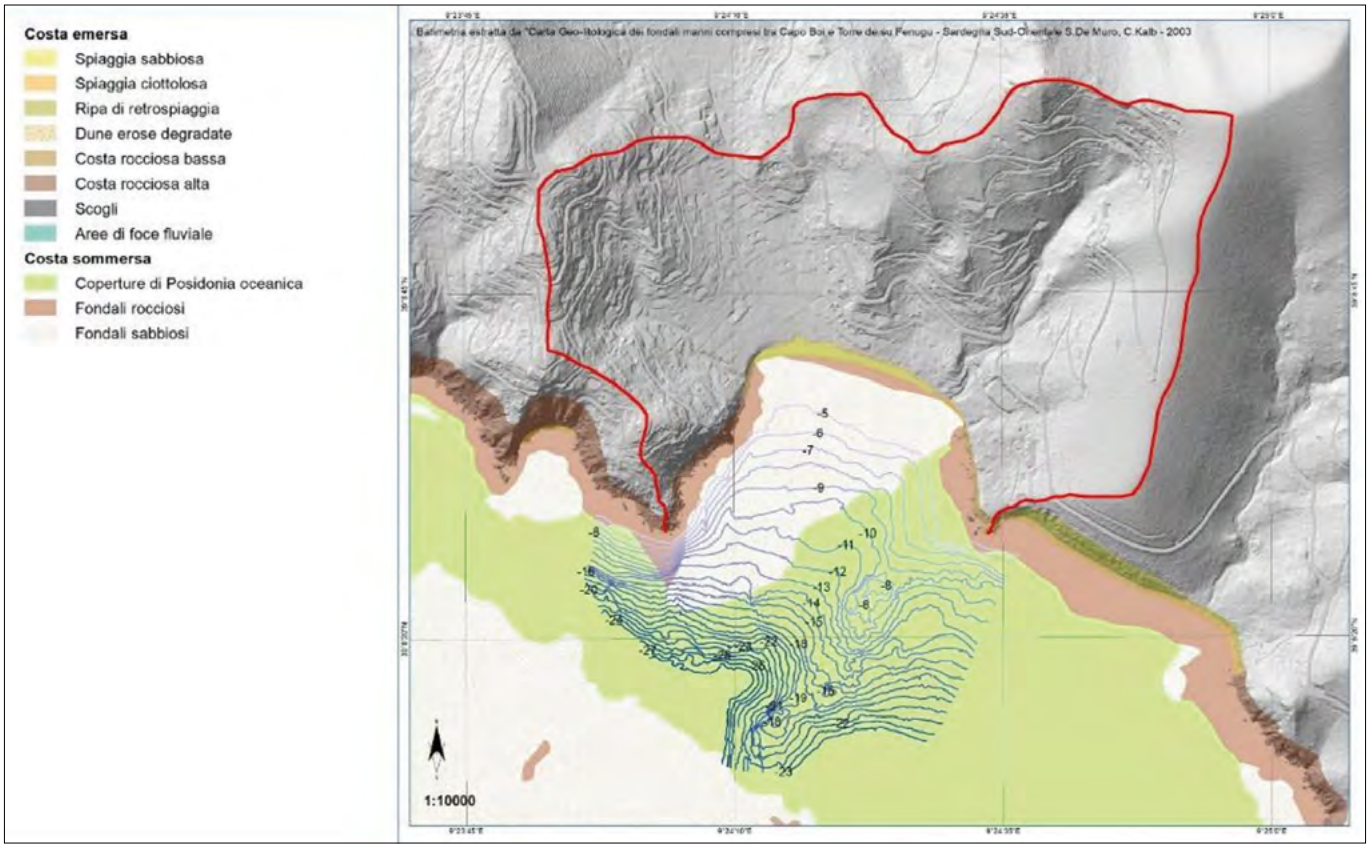


Figura 14. Attuale unità geomorfologica di Genna 'e Mari nell'area emersa e nell'area sommersa, batimetrie tratte da "Carta Geo-litologica dei fondali marini compresi tra Capo Boi e Torre de su Fenugu – Sardegna Sud-Orientale S. De Muro, C. Kalb – 2003.

metrico nella spiaggia sommersa, che si può osservare con l'affioramento di substrati rocciosi (*beach rock*) e ciottolosi.

Il decremento volumetrico, che è manifesto indizio di erosione, si osserva nel settore orientale della spiaggia, coincidente con un sensibile arretramento, in corrispondenza della linea di riva dove affiora uno scoglio (+ 1.5 m sul livello del mare attuale) che negli anni '50 era completamente ricoperto di sabbia.

Di fatto, lungo quel transetto, il profilo di spiaggia si è abbassato di circa 1.5 m, mentre la riduzione della superficie di spiaggia non è imputabile tanto all'arretramento della linea di costa sabbiosa, quanto invede ad un avanzamento della linea di retrospiaggia come conseguenza dell'urbanizzazione e della costruzione di edifici in aree che erano di competenza della spiaggia e dell'ambiente marino di transizione.

Evidentemente il processo erosivo che interessa la spiaggia di Genna 'e Mari ha origini lontane, ma negli ultimi anni ha subito una forte accelerazione, dovuta ad eventi meteorologici e meteomarini intensi, ma anche e soprattutto perché la vulnerabilità del sistema è continuamente aumentata e la spiaggia è sempre meno resiliente, in ragione del fatto che la disponibilità di sedimento è fortemente deficitaria, e sempre più vulnerabile, in ragione della dinamica riflessiva, conseguenza dell'irrigidimento del retrospiaggia e della morfologia del fondo marino.

Le mappe in Figura 18 riassumono lo studio dei fenomeni e dei processi che interessano la spiaggia emersa e

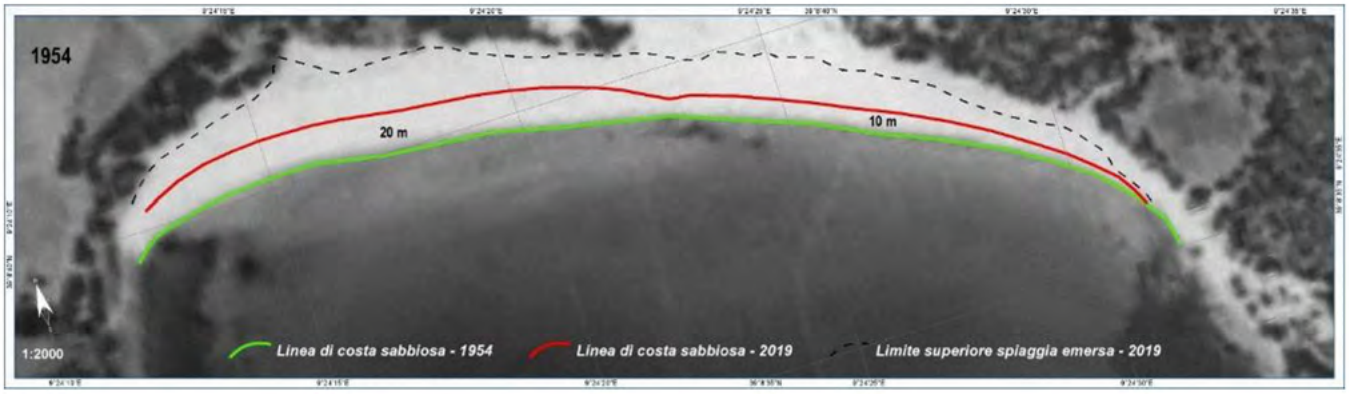


Figura 15. Arretramento della linea di costa sabbiosa dagli anni 50 ai tempi attuali.

Figura 16. Immagine aerea della pocket beach di Genna 'e Mari nel 2019.

Figura 17. Genna 'e Mari, a sx alla fine degli anni '60 (1967 / 1968) immagine tratte da https://torredellestelle.wordpress.com, a dx maggio 2022.

sommersa e la duna residuale, osservati negli ultimi anni e la cui evoluzione è indice di un progressivo dissesto di tutto il sistema.

In rosso sono segnalati i punti di osservazione ed i processi di ambiente sommerso, in azzurro sono segnalati i punti di osservazione ed i processi di ambiente emerso.

A passare dal 2007 al 2020 sono evidenti gli effetti di un crescente stato di dissesto, di un progressivo arretramento di tutto il sistema sabbioso emerso, testimoniato da morfologie regressive, e di un progressivo e complementare decremento volumetrico che interessa l'ambiente sommerso, testimoniato da fenomeni erosivi subacquei e aumento delle superfici dei fondi duri.

La Figura 19 mostra l'ambiente sommerso dell'unità geomorfologica di Genna 'e Mari, nel complesso il sistema appare stabile, con il limite superiore della prateria di Posidonia oceanica ben delineato.

Le osservazioni subacquee fanno constatare il buon stato vegetale della prateria di Posidonia oceanica, ma fanno anche notare che nel settore più profondo della spiaggia sommersa, che corrisponde ad un canale, prosecuzione dell'impluvio a monte, vi sia un deposito di sabbie in evo-

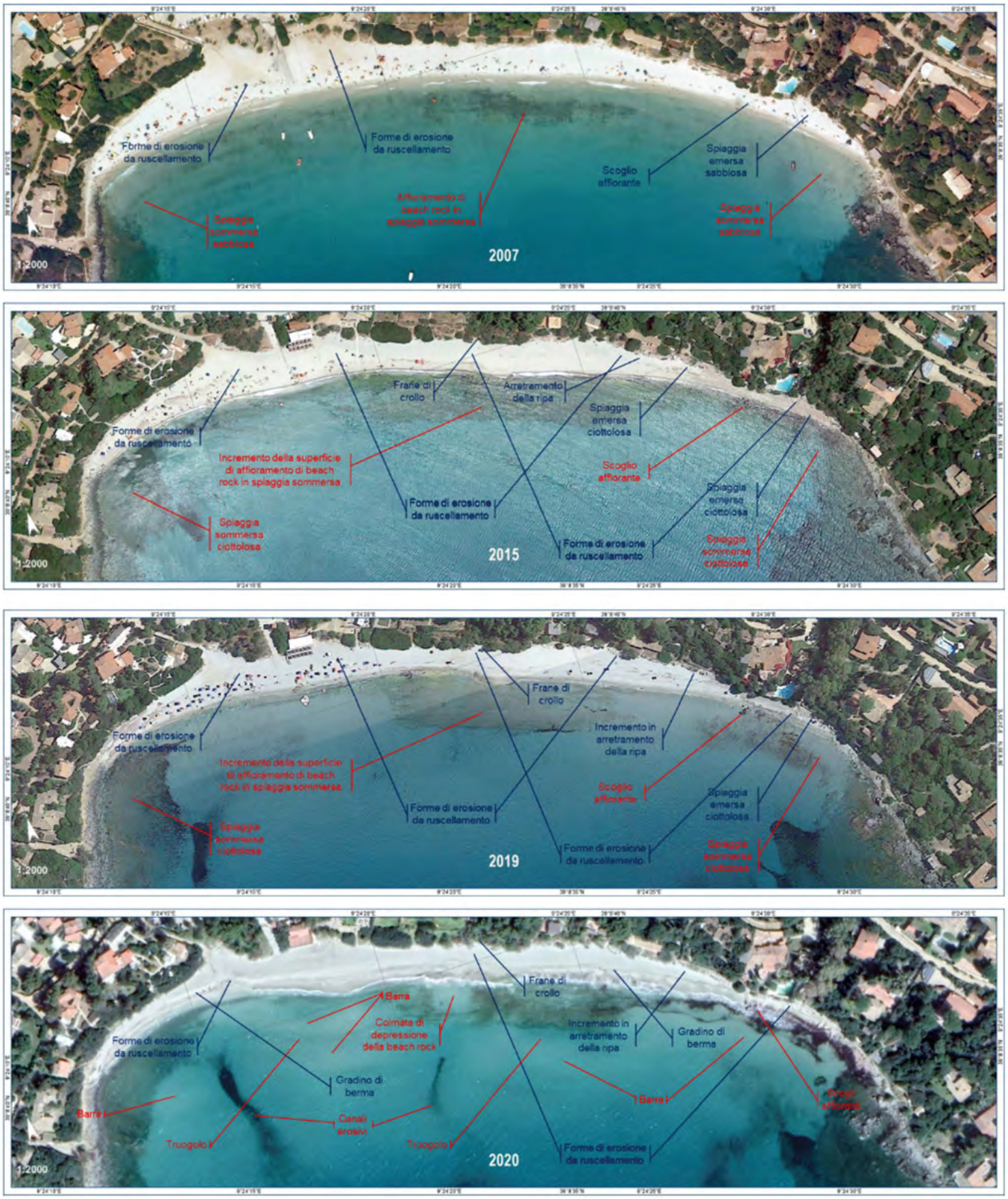


FIGURA 18. Studio geomorfologico attraverso fotointerpretazione, rilievi in campo subaerei e subacquei, dei punti di osservazione, delle morfologie e della dinamica dei processi geomorfologici in area emersa e sommersa.

luzione e che il lobo più esterno, in prossimità del capo del promontorio occidentale sia in accrezione.

Le testimonianze storiche raccolte raccontano di una nave draga che prelevava sabbie dai fondali... pertanto la domanda sorge spontanea: la dinamica subacquea dei sedimenti verte ad un riequilibrio morfologico della spiaggia sommersa?

Di fatto parrebbe, come si osserva nell'immagine 2016 e nell'immagine 2020, che i canali erosivi in spiaggia sommersa, che trovano omologhe morfologie in ambiente emerso, determinino un trasporto verso il settore più depresso e verso il promontorio occidentale, in cui periodicamente si verifica l'accumulo di sedimento e di detriti fini di Posidonia oceanica, anche in ragion del fatto che i substrati rocciosi subacquei e la prateria di Posidonia oceanica confinano l'ambiente di sedimentazione.

Sarebbe interessante confrontare rilievi batimetrici di differenti periodi per confermare tale ipotesi.

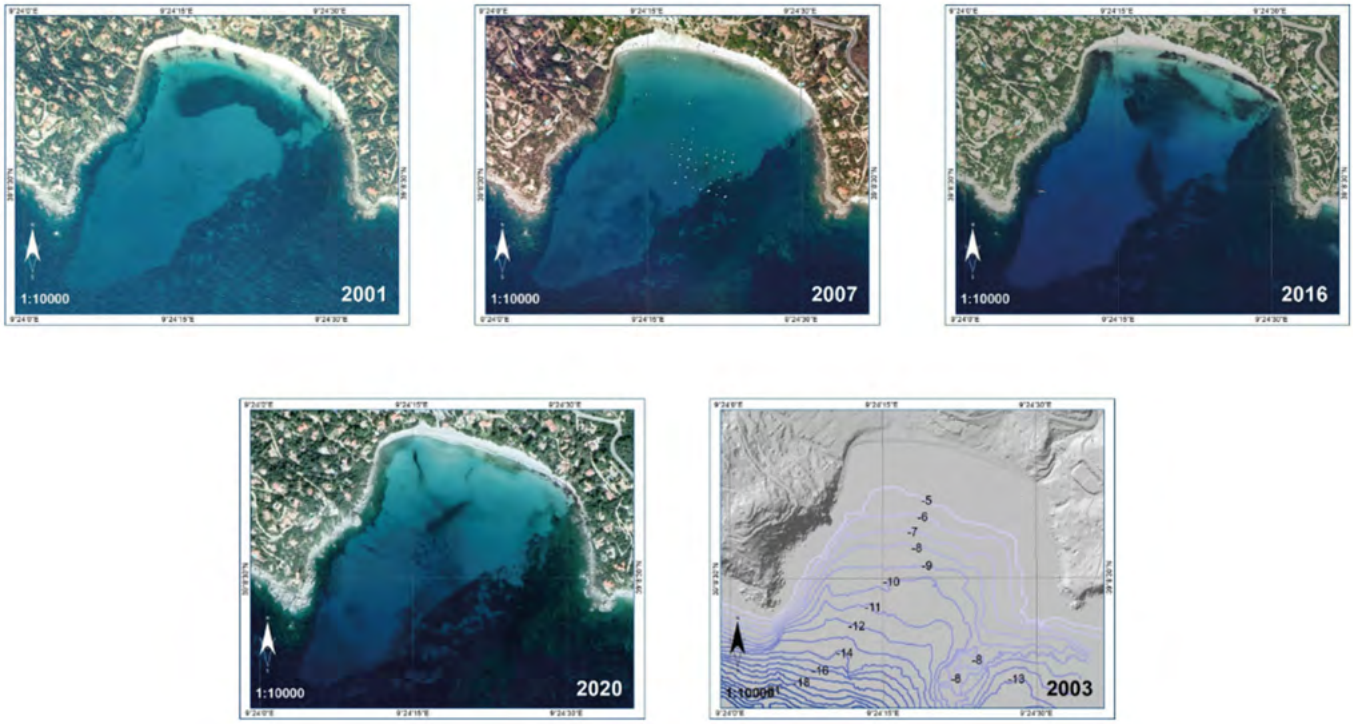


Figura 19. L'ambiente sommerso dell'unità geomorfologica di Genna 'e Mari.

DINAMICA EVOLUTIVA

Le immagini successive mostrano, attraverso fotografie acquisite in divere multitemporali osservazioni, le morfologie e le tipologie di processi erosivi di genesi continentale e marina, rappresentati nelle mappe di Figura 18, e consentono di confermare l'evoluzione regressiva dell'azione erosiva, per effetto della quale la spiaggia è giunta ad un livello di vulnerabilità estremo e verso un sempre più basso potenziale di resilienza, a cui sarà necessario far fronte con interventi strutturali, ma anche non strutturali.

Questo processo erosivo determina il contestuale e progressivo decremento volumetrico ed un significativo arretramento che si riscontra non solo dalla posizione della linea di costa, ma anche dalla posizione della ripa di erosione sul retrospiaggia e dalla morfologia della spiaggia emersa.

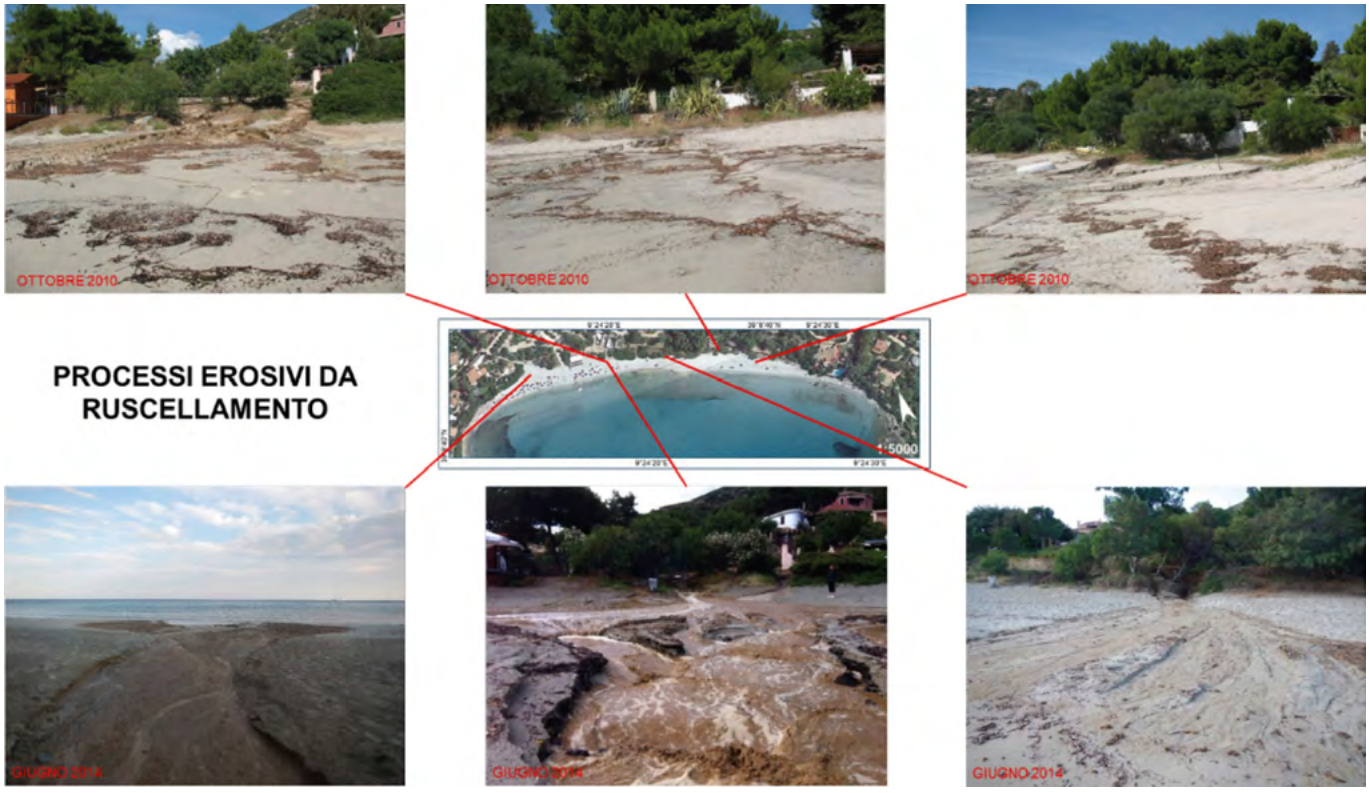


Figura 20. Processi erosivi da ruscellamento, l'intenso grado di infrastrutturazione e di impermeabilizzazione dell'unità geomorfologica emersa, caratterizzata da forti pendenze dei versanti, determinano la concentrazione dei deflussi superficiali che in massa raggiungono la spiaggia, dissestandola pesantemente e favorendo il trasporto detritico verso la spiaggia sommersa dove morfologie analoghe tendono ad allontanarlo verso le aree più profonde.

FIGURA 21. Processi erosivi da ruscellamento e frana, a seguito di fenomeni di ruscellamento con sviluppo di vasti e profondi solchi di erosione (nell'evento 2021 son stati stimati volumi erosi pari a circa 600 m^3) la sabbia si livella mascherando le morfologie, ma abbassa il suo profilo risultando più vulnerabile all'attacco del moto ondoso; nel settore centrale della spiaggia i fenomeni di ruscellamento sono evoluti in fenomenologie che hanno assunto la dinamica di frane di crollo, il progressivo arretramento della ripa di erosione sta interessando la viabilità d'accesso alla spiaggia e anche le proprietà private.

FIGURA 22. Processi erosivi da azione del mare, l'affioramento di una diffusa spiaggia ciottolosa in spiaggia emersa e sommersa è sintomatico dell'allontanamento di importanti volumi, la modifica del profilo di spiaggia è testimoniato dall'arretramento costante della ripa di erosione e sebbene in sporadiche occasioni si possa osservare una copertura sabbiosa (2022), questa consta di un velo di sedimenti che si sono mobilizzati dall'adattamento della ripa di erosione alle morfologie erosive per un conseguente arretramento della stessa e un ulteriore abbassamento del profilo.

L'immagine di Figura 23 dimostra quale sia l'entità della carenza di sedimento e la modifica della spiaggia da dissipativa a riflessiva, come conseguenza della edificazione di strutture in spiaggia.

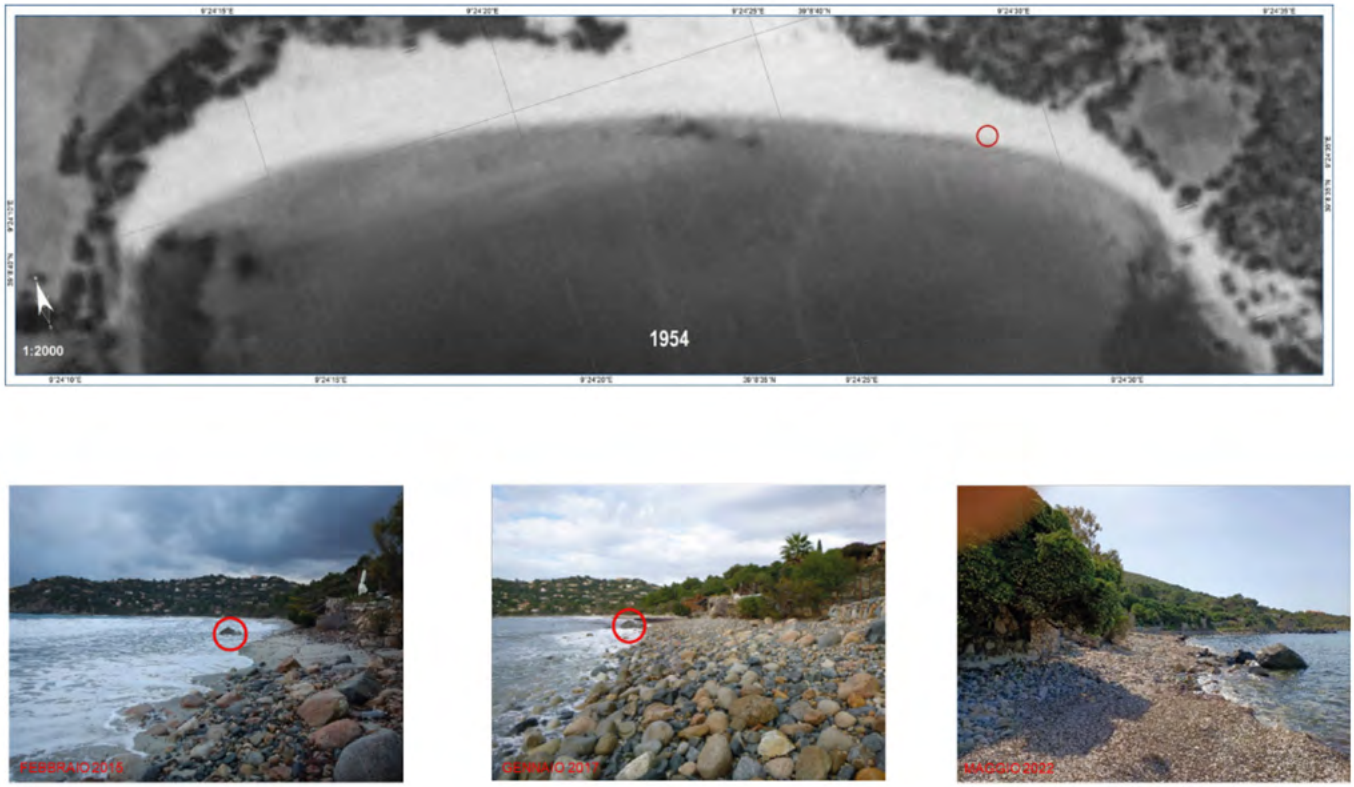


Figura 23. Lo scoglio cerchiato (+1.5 m sul livello del mare attuale), l'affioramento di una spiaggia di ciottoli e blocchi dimostra che la carenza volumetrica di sedimento è di enormi dimensioni, le costruzioni edificate in spiaggia, secondo quello che si osserva nella ortofoto del 1954, hanno avanzato la linea di retrospiaggia e irrigidito la risposta geomorfologica.

Alla contrazione volumetrica si associa l'abbassamento del profilo di spiaggia, con particolare riferimento alla porzione emersa, con questa progressione la spiaggia è maggiormente vulnerabile agli effetti distruttivi delle mareggiate; il moto ondoso per questo motivo, sempre con maggiore frequenza, raggiunge la ripa di erosione causandone lo scalzamento al piede e conseguenti fenomenologie di crollo e progressiva regressione.

Figura 24. Processi erosivi da mare, l'appiattimento della piaggia emersa consente al mare, anche in occasione di mareggiate non eccezionali di incidere sul limite superiore della spiaggia, modellando la ripa di erosione sul residuo dunale e scalzando la scarpata accentua i fenomeni di crollo, questa continua azione sta insidiando anche la stabilità della vegetazione naturale.

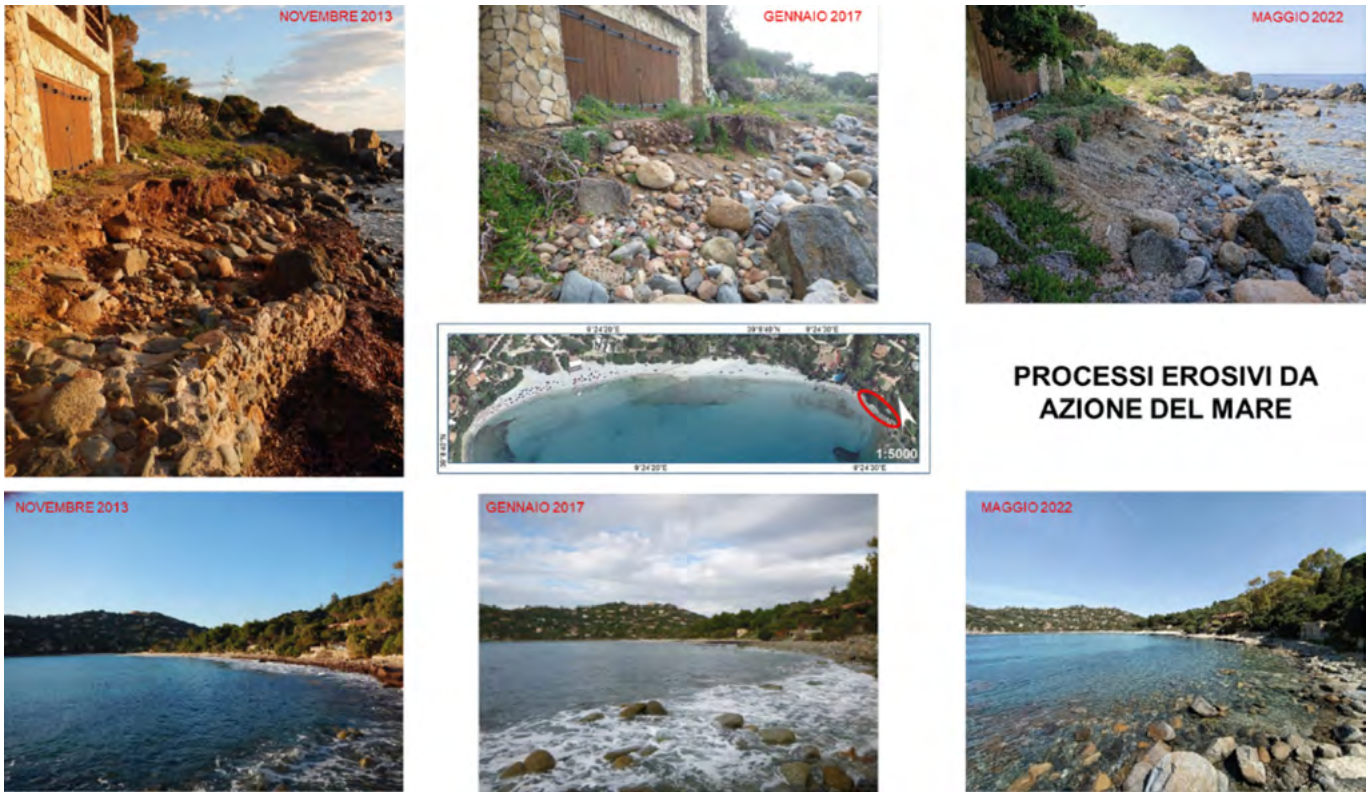


FIGURA 25. Processi erosivi da mare, nel settore estremo orientale del fondo baia, la spiaggia e la duna rampante sono state completamente erose, il processo erosivo ha messo in evidenza una spiaggia emersa e sommersa di ciottoli e blocchi ha demolito artefatti un tempo costruiti in spiaggia e oggi interessa anche i fabbricati.

FIGURA 26. Stato attuale, a sx l'alveo dell'unico corso d'acqua che alla spiaggia nel settore orientale, è stato osservato, anche in occasione di eventi di pioggia intensa che i deflussi sono minimi e il trasporto solido è pressoché nullo; a dx settore centrale della spiaggia dove i deflussi ruscellanti incanalati in un sentiero per giungere alla spiaggia, hanno originato il processo erosivo evoluto in fenomeni di crollo.

CONCLUSIONI

Lo studio geomorfologico condotto sul sistema costiero di Genna 'e Mari ha messo in evidenza un progressivo fenomeno erosivo innescato dalle modificazioni apportate alla unità geomorfologica negli anni '60 e che è evoluto, in circa 70 anni, fino a condizionare gravemente la stabilità morfologica e morfosedimentaria della spiaggia.

L'attuale unità geomorfologica, caratterizzata da intensa urbanizzazione e impermeabilizzazione dei substrati, non fornisce l'alimentazione detritica necessaria a riequilibrare il bilancio sedimentario del sistema di spiaggia, e piuttosto condiziona pesantemente i fenomeni erosivi continentali, in progressiva evoluzione, che causano il depauperamento del sistema.

L'adattamento morfologico della spiaggia in conseguenza ai processi erosivi ne accresce la vulnerabilità nei confronti dell'azione del moto ondoso, che sempre con maggior frequenza incide con lo scalzamento della ripa di retrospiaggia in una continua dinamica regressiva.

In definitiva si osserva che gli apporti sedimentari sono molto limitati, il bilancio sedimentario è in forte passivo, il sistema di spiaggia è impossibilitato all'arretramento e i fenomeni erosivi sono continuamente attivi e stanno interessando le infrastrutture pubbliche e private.

Monitoraggio dell'erosione costiera in Emilia-Romagna. Metodi, strumenti, banche dati e Strategia GIDAC

Coastal erosion monitoring in Emilia-Romagna Region. Methods, tools, databases and GIDAC strategy

Flavia Sistilli[1], Lorenzo Calabrese[2], Nunzio De Nigris[1], Jessica Lelli[2], Roberto Montanari[2], Maurizio Morelli[1], Luisa Perini[2]

[1] Arpae Emilia-Romagna
[2] Regione Emilia-Romagna

E-mail: fsistilli@arpae.it (F. Sistilli), lorenzo.calabrese@regione.emilia-romagna.it (L. Calabrese), ndenigris@arpae.it (N. De Nigris), jessica.lelli@regione.emilia-romagna.it (J. Lelli), roberto.montanari@regione.emilia-romagna.it (R. Montanari), mauriziomorelli@arpae.it (M.Morelli), luisa.perini@regione.emilia-romagna.it (L. Perini)

Parole chiave: erosione costiera, monitoraggio, indicatori, banche dati, strategia Gidac
Key words: coastal erosion, monitoring, indicators, database, Gidac strategy

INTRODUZIONE

Il litorale emiliano-romagnolo, come tutte le regioni costiere italiane, è soggetto a una diffusa azione erosiva. I primi fenomeni si registrano già nei primi anni del '900, e le prime opere di cui si ha conoscenza per la difesa dall'erosione costiera del litorale regionale sono state documentate nella cartografia tecnica 'Primo Impianto IGM del 1893', dove è mappato un argine che separa la Sacca di Goro (o dell'Abate) dalle valli in corso di bonifica e da una porzione del bosco della Mesola (Regione Emilia-Romagna, 2022), sulla spiaggia di Viserba, dove furono costruiti 5 pennelli lunghi 30 m e distanziati 150 m nel 1917-1918 (Regione Emilia-Romagna, 1984) e a Porto Garibaldi, dove sono state osservate alcune scogliere in mare dalle ortofoto del 1935 (Regione Emilia-Romagna, 2022). Alla fine degli anni '70 del secolo scorso, a causa dell'inasprimento del fenomeno erosivo che iniziava a compromettere anche lo sviluppo dell'economia turistico-balneare, la Regione Emilia-Romagna, pur essendo la difesa del litorale materia di competenza statale, intervenne con l'approvazione della Legge Regionale Emilia-Romagna 7/1979 "*Interventi della Regione Emilia-Romagna per la difesa della costa adriatica ai fini ambientali, turistici e di protezione degli insediamenti civili e produttivi*".

La Regione Emilia-Romagna, con la L.R. 7/1979, promuove la realizzazione di un piano progettuale per la difesa della costa adriatica, per identificare i fattori principali incidenti dell'erosione, e la realizzazione di una serie di rilievi (topografici, batimetrici, moto ondoso, ...) per tenere sotto controllo l'evoluzione dei fenomeni dell'erosione e della subsidenza.

Inizia così l'implementazione delle reti di monitoraggio e la sistematizzazione delle conoscenze e dei dati raccolti. Oggi si dispone di un importante sistema di reti di monitoraggio del fenomeno dell'erosione costiera e di una organizzata banca dati, che permette di seguire costantemente l'evoluzione del fenomeno erosivo e pianificarne gli interventi di gestione.

1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il litorale della Regione Emilia-Romagna è costituito da una spiaggia bassa e sabbiosa, che si sviluppa per 110 km da Cattolica (confine sud con la Regione Marche) alla foce del Po di Volano, e dal sistema barriera-laguna della Sacca di Goro, nella zona nord (Arpae, 2020), Figura 1.

Le deboli pendenze ed un'ampia zona di frangimento nella parte sommersa danno luogo a spiagge sabbiose di tipo dissipativo. L'area è una pianura costiera facente parte della piana alluvionale del Po, la cui formazione è da riferirsi al periodo di regressione marina post glaciale (da 6000 anni fa in poi) quando gli apporti fluviali diventano dominanti sulle altre forzanti (Bondesan *et al*., 1995).

I principali fattori che dominano la morfodinamica costiera attuale sono il bilancio sedimentario negativo a causa del mancato apporto di sedimento da parte dei fiumi, la subsidenza (naturale e antropica), gli impatti degli eventi meteo-marini, il trasporto solido *longshore* diretto prevalentemente da sud verso nord.

L'area marina antistante le coste regionali, così come tutto l'alto Adriatico, è caratterizzata da un clima d'onda di bassa energia; il 60% delle mareggiate ha un'onda significativa (Hs) < 1 m (Regione Emilia-Romagna, 1996 e Ciavola *et al*., 2007) con direzione prevalente tra i 60°-120° (SE - venti di Scirocco), mentre le più energetiche interessano il quadrante E-NE (venti di Bora) (Regione Emilia-Romagna, 1996).

Un ulteriore fenomeno che caratterizza l'alto Adriatico è lo 'storm-surge' che determina l'innalzamento totale del livello del mare al di sopra delle massime maree sigiziali, la cosiddetta 'acqua alta', che colpisce fortemente Venezia e le coste dell'Emilia-Romagna innescando processi di ingressione marina. L'acqua alta è generata dalla combinazione di fattori astronomici, l'alta marea, e meteorologici. I fenomeni di bassa pressione atmosferica in Adriatico, infatti, determinano una sopraelevazione della superficie del mare

FIGURA 1. Litorale emiliano-romagnolo (Arpae, 2020).

che, se accompagnata da venti di SE, provocano un impilamento delle acque verso nord. Tali eventi sono spesso seguiti da oscillazioni libere della superficie del mare (sesse) che in un bacino semichiuso come quello adriatico possono persistere anche per diversi giorni dopo la cessazione dei fattori perturbativi che le hanno innescate. Mareggiate e fenomeni di acqua alta, soprattutto quando combinati, determinano fenomeni di erosione e ingressione marina lungo le coste regionali a causa dell'assetto morfologico della piana costiera (vaste aree con quote altimetriche prossime e inferiori al livello del mare) e della compromissione delle difese naturali (spiaggia e duna) (Perini *et al*., 2011).

La costa emiliano-romagnola ha visto infatti, dal dopoguerra in poi, uno sviluppo repentino del settore turistico che ha portato a una progressiva urbanizzazione della costa, dove strutture ricettive di vario tipo nel tempo hanno sostituito i cordoni dunosi. A oggi la maggior parte del territorio presenta pochi ed isolati residui di cordone dunoso, a eccezione della Riserva Naturale della Duna Costiera Ravennate e della Foce del Torrente Bevano, caratteristica per la presenza di un cordone dunoso perlopiù continuo di circa 6 km.

2. L'EROSIONE COSTIERA IN EMILIA-ROMAGNA

Dal punto di vista ambientale, la costa è un ecosistema di transizione dove agiscono i processi di entrambi gli ecosistemi limitrofi, terrestre e marino. Sono numerosi quindi i fattori che ne determinano l'evoluzione, alle diverse scale spaziali e temporali, che si realizza attraverso un continuo adattamento delle morfologie, un equilibrio di tipo dinamico. Tale dinamicità diventa un fattore di sensibilità del sistema quando gli impatti delle attività antropiche vanno a modificare i flussi naturali come quello del trasporto sedimentario costiero.

In Emilia-Romagna il problema dell'erosione costiera inizia già nella prima metà del '900 quando la riduzione delle portate solide dei fiumi determina da una parte lo smantellamento dei principali apparati deltizi e dall'altra il ripascimento naturale dei tratti di costa interposti testimoniata anche dalla formazione di nuovi cordoni dunosi. Dal dopoguerra in poi una serie di concause determina l'inasprirsi di questa crisi erosiva. I cambiamenti nell'uso del suolo (da seminativi a prati e boschi), la grande attività estrattiva negli alvei, la repentina urbanizzazione dell'arenile e il parallelo smantellamento dei cordoni dunosi (serbatoi di sabbia), assieme alla regimazione fluviale producono un sistema costiero ingessato e degradato non più in grado di recuperare dopo la stagione avversa e caratterizzato da un budget sedimentario negativo (GNRAC, 2006).

A questi fattori soprattutto tra gli anni '60 e '70 del secolo scorso si aggiunge un'importante fase di subsidenza del territorio, indotta dagli emungimenti di fluidi (acqua e idrocarburi) con tassi fino a 110 mm/anno nella zona industriale di Ravenna (Teatini *et al*., 2005). L'incremento della subsidenza litoranea ha prodotto conseguentemente l'incremento dell'erosione delle spiagge.

Di pari passo con l'erosione è proseguito il ricorso ad opere di difesa che, assieme alle opere portuali, hanno modificato notevolmente la dinamica costiera e il trasporto solido lungo costa. In particolare i primi ricorsi ad opere di tipo rigido della prima metà del XX secolo hanno prodotto un effetto a cascata di erosione delle spiagge sottoflutto che ha portato nel giro di qualche decennio ad avere, al 2018, circa 70 km di costa, sui 110 km da Cattolica a Foce di Volano, difese con opere di tipo rigido (Arpae, 2020).

Oggigiorno, i prelievi di sedimento in alveo sono ridotti e regolamentati, e la subsidenza del litorale, seppur ancora presente con tassi medi di 3 mm/anno (Arpae, 2018), non si manifesta più con gli abbassamenti centimetrici degli anni '70 del secolo scorso, in seguito alla riduzione degli emungimenti idrici e al progressivo esaurimento dei giacimenti di idrocarburi. La riduzione dell'utilizzo di acque di falda è stata possibile grazie alle strategie di intervento strutturale messe in atto dalla Regione per privilegiare l'utilizzo di acque superficiali per i fabbisogni umani, prime fra tutte la realizzazione dell'acquedotto di Romagna, che prende l'acqua dalla diga di Ridracoli (FC) e del Canale Emiliano-Romagnolo (CER), che porta in romagna l'acqua del Po.

In alto Adriatico non si osserva una chiara tendenza di incremento dell'energia del moto ondoso (Ciavola *et al*., 2011; Ciavola & Jimènez, 2013; Valentini, 2016), ma un lieve aumento dei fenomeni di "storm surge" (acqua alta), che, come accennato in premessa sono quelli maggiormente impattanti soprattutto in termini di allagamento delle zone costiere (Perini *et al*., 2011). Questi fenomeni, unita-

mente alla perdita di aree emerse potrebbero subire un'accelerazione in futuro come conseguenze dell'innalzamento del livello del mare indotto dai cambiamenti climatici. Il valore di innalzamento medio, registrato a scala globale attraverso l'osservazione dei dati satellitari, sarebbe stato di circa 3,4 ± 0,3 mm/anno negli ultimi 30 anni (1993-2022), anche se il tasso sarebbe raddoppiato nell'ultimo decennio (2013-2022) (WMO, 2022). Il più recente dei rapporti dell'IPCC, sesto rapporto AR6 (Fox-Kemper *et al*., 2021), evidenzia come questa accelerazione possa subire un drastico incremento nei prossimi decenni, con valori variabili da circa 40 cm a oltre 100 cm al 2100, in funzione dei diversi scenari emissivi di gas serra. Questa tendenza aumenterà inevitabilmente l'instabilità delle aree costiere anche in Emilia-Romagna, peggiorando la stima che è stata fatta nel 2017, applicando i dati di innalzamento del livello del mare riportati nel rapporto IPCC 2014 (AR5) e i tassi di subsidenza misurati nel periodo 2006-2012 (Perini *et al*., 2017). Nel peggiore degli scenari considerati, che ipotizza un innalzamento del livello del mare di 55 cm al 2100, l'incremento delle aree con quota sotto il livello sarebbe del 25%, ovvero circa 150 km^2, molti dei quali non direttamente connessi al mare, quindi non dovrebbero risultare sommersi. L'incremento delle aree allagabili per effetto di mareggiate con tempo di ritorno di 100 anni, sarebbe invece di circa 3,5 volte rispetto alle aree mappate ai fini della direttiva alluvioni (Perini *et al*., 2012). Al 2018, 55 km (47%) di costa sono risultati soggetti a condizioni erosive, rispetto al 2012. Grazie a una serie di interventi di ripascimento, realizzati dalla Regione e dagli Enti locali, solo 21 km (18%) di litorale mostravano segni di erosione. Nel periodo 2012-2018 sono stati portati a ripascimento oltre 3,25 milioni di mc di sabbia di cui 1,48 milioni provenienti da fonti esterne del sistema litoraneo, il restante derivato da prelievi in corrispondenza di aree di accumulo (Arpae, 2020).

3. LE RETI DI MONITORAGGIO DELL'EROSIONE COSTIERA

Le reti di monitoraggio sono gestite e implementate dall'Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell´Emilia-Romagna (Arpae) nell'ambito delle attività istituzionali di monitoraggio ambientale su incarico della Regione Emilia-Romagna.

3.1. Rete Geodetica Costiera

L'accuratezza delle misure dei rilievi topo-batimetrici è la variabile che sta alla base dell'affidabilità di tali dati e quindi di tutte le elaborazioni successive: i modelli digitali delle spiagge e i loro confronti nel tempo per la stima delle variazioni volumetriche e degli spessori di sedimento accumulato/eroso e quindi, in ultima analisi, della valutazione dello stato della spiaggia. "Una non corretta misura della quota di spiaggia di pochi centimetri determinerebbe un errore di migliaia di metri cubi di sabbia erosa o depositata" (Arpae, 2020).

Proprio allo scopo di fornire i riferimenti per un corretto e omogeneo inquadramento geodetico dei rilievi, per la zona costiera, nel 2016-2017 è stata progettata e realizzata la Rete Geodetica Costiera (RGC). Il lavoro è stato svolto nell'ambito di un accordo tra l'attuale Unità Mare Costa di Arpae e il Dipartimento di Ingegneria civile, chimica, ambientale e dei materiali - DICAM, dell'Università di Bologna.

Il progetto della rete ha previsto la presenza di un vertice mediamente ogni 4 km e a tale scopo si è proceduto all'individuazione di vertici già esistenti appartenenti ad altre reti di livellazione, in primis Arpa 2005 (Rete Regionale di Controllo della Subsidenza) e altre reti (IGM95, GPS-7, altri enti locali), e solo in ultima istanza si è proceduto alla materializzazione di vertici ex-novo.

Le coordinate planimetriche e la quota ellissoidica sono state individuate mediante 5 campagne di rilievo GNSS (rilievo in modalità statica e NRTK) nel sistema di riferimento nazionale ETRS89-ETRF2000 (2008.0) (Decreto Ministeriale 10/11/2011).

La quota ortometrica (m sul livello del mare) è stata determinata partendo dalla quota della rete Arpa 2005 (ottenuta con misure di livellazione geometrica di alta precisione), e aggiornata al maggio 2011 tramite i modelli di subsidenza disponibili ottenuti con misure interferometriche satellitari.

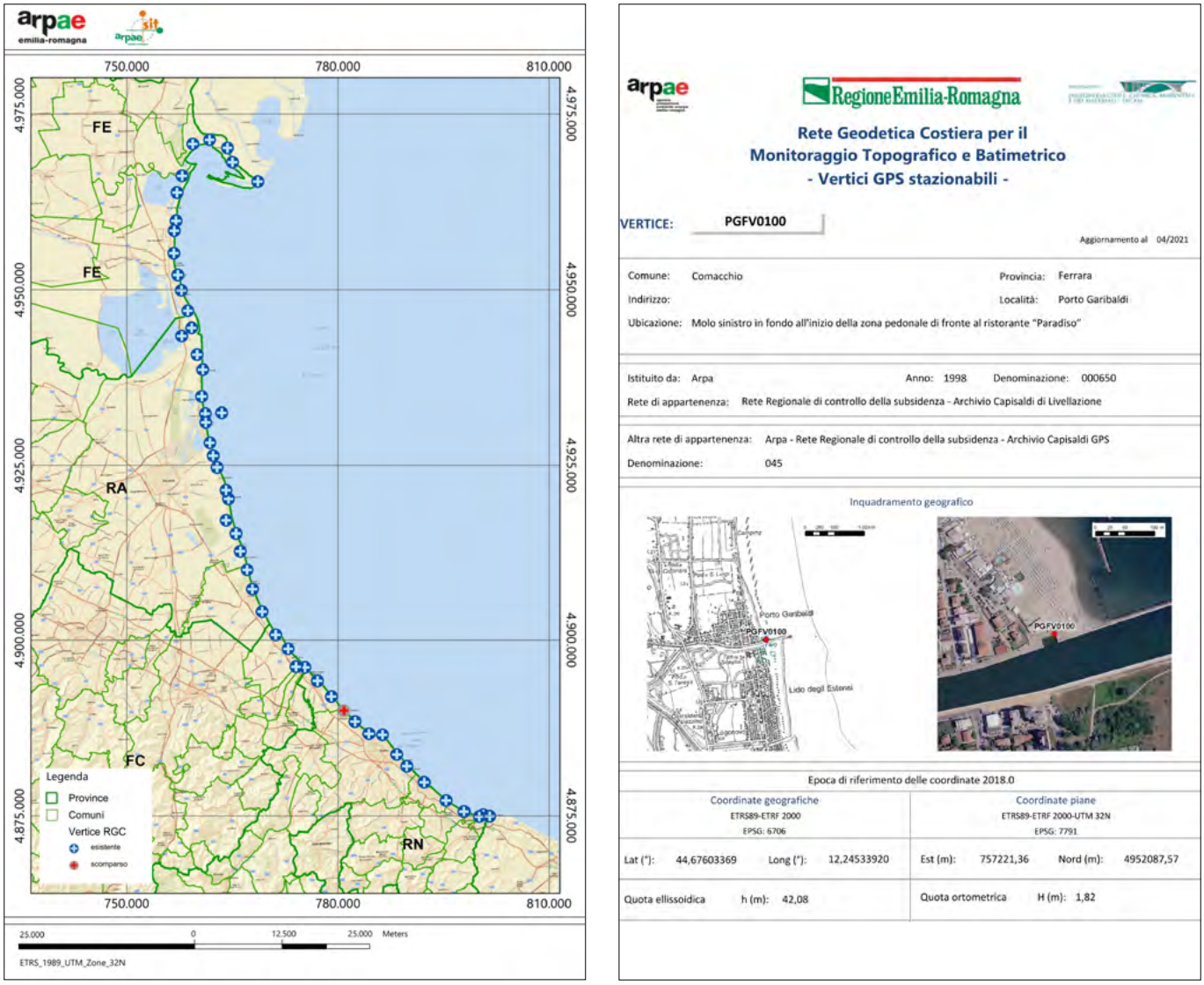
La RGC al suo impianto era costituita da 40 vertici (2018), in seguito alla necessità di raffittire alcune zone dove i vertici erano particolarmente distanti e alla richiesta degli operatori di disporre più vertici per agevolare le operazioni di inquadramento geodetico, la rete è stata implementata portando a 51 i vertici disponibili nel 2021 (Figura 2a). L'implementazione è stata l'occasione anche per l'aggiornamento delle monografie, in particolare si è deciso di riportare le coordinate a un'unica epoca (2018.0) prossima ai rilievi GNSS di impianto. Le quote ortometriche, riferite a maggio 2011, sono state aggiornate all'epoca 2018.0 utilizzando la velocità di subsidenza del modello Arpae 2011-2016 (Arpae, 2018), resosi nel frattempo disponibile.

Le monografie dei vertici della RGC (Figura 2b) sono consultabili e scaricabili dal Portale Cartografico di Arpae.

Attualmente è in corso, dopo l'ultima realizzata nel 2005, una nuova campagna di livellazione geometrica di alta precisione che fornirà la quota ortometrica aggiornata al 2023 di ogni vertice, da Gabicce al faro di Goro (Comacchio). La rete verrà collegata sia ai capisaldi IGM che al caposaldo di riferimento del mareografo di Porto Garibaldi (Comacchio). Questo porterà a un secondo aggiornamento delle monografie, dove sarà disponibile sia la quota geoidica riferita al livello medio mare misurato dal mareografo di Genova 1942 (riferimento Nazionale), sia la quota rispetto al livello medio mare misurato dalla stazione mareografica integrata con GNSS permanente di Porto Garibaldi (riferimento Locale).

3.2. Rete di monitoraggio topo-batimetrico e linea di riva

Il monitoraggio dell'evoluzione morfologica della spiaggia è fondamentale per la conoscenza del fenomeno erosivo. Attraverso il confronto tra i profili rilevati nella



a) **b)**

Figura 2. a) Rete Geodetica Costiera della Regione Emilia-Romagna. b) Esempio di monografia di vertice della RGC. (Arpae, 2020).

stessa posizione nel tempo (Figura 3a) e relativi modelli tridimensionali ottenuti dall'interpolazione spaziale dei dati puntuali (Figura 3b) è possibile evidenziare le modifiche morfologiche, quantificare gli spessori e i volumi di sabbia erosi/accumulati (Figura 3c) e valutare quindi i tassi di erosione costiera.

La rete regionale topo-batimetrica fu istituita nel 1984 da Idroser, costituita da 150 sezioni perpendicolari alla costa, a partire dalla zona più alta della spiaggia fino oltre la profondità chiusura.

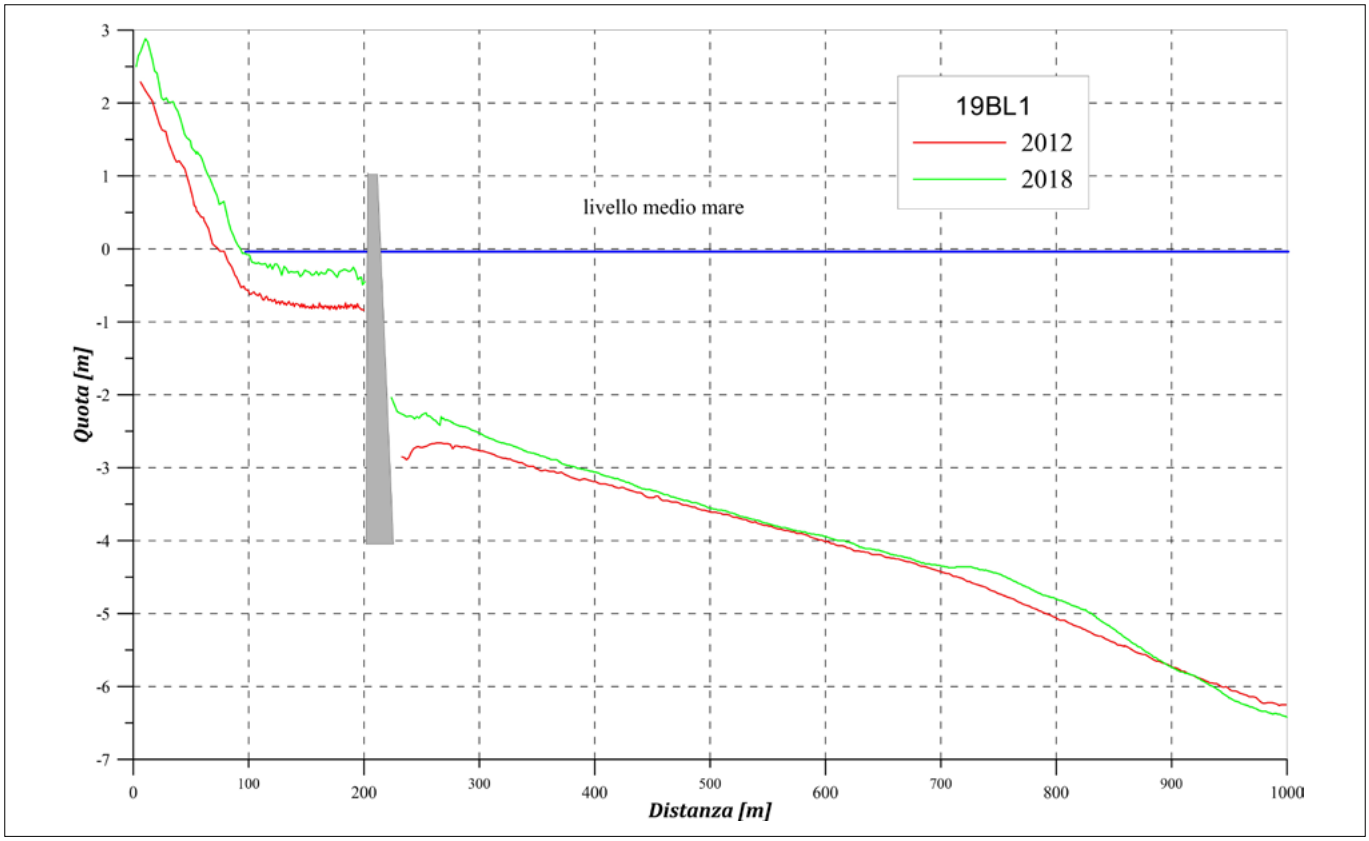
Nelle successive campagne (1993, 2000, 2006, 2012, 2018) la rete è stata progressivamente integrata e migliorata. Nell'ultima campagna topo-batimetrica (6ª campagna topo-batimetrica del 2018) sono stati rilevati oltre 1000 km di sezioni, suddivise in:

- 251 sezioni principali perpendicolari a costa, dal piede dunale o dalla base della prima struttura fino in mare oltre la profondità di chiusura, a seconda dei casi variabile tra i -6 e i -10 m s.l.m.;
- 163 sezioni secondarie perpendicolari alla costa, che si spingono in mare fino alla batimetrica dei 4-5 m, per una migliore identificazione e rappresentazione della barre sommerse, laddove presenti;
- una serie di sezioni longitudinali individuate nelle zone di maggior interesse della spiaggia con diverse configurazioni a seconda del tratto: spiaggia alta, linea di riva (quota 0 m s.l.m.), intermedio scogliera, interno scogliera, esterno scogliera, esterno pennelli, scogliera radente lato mare, barre.

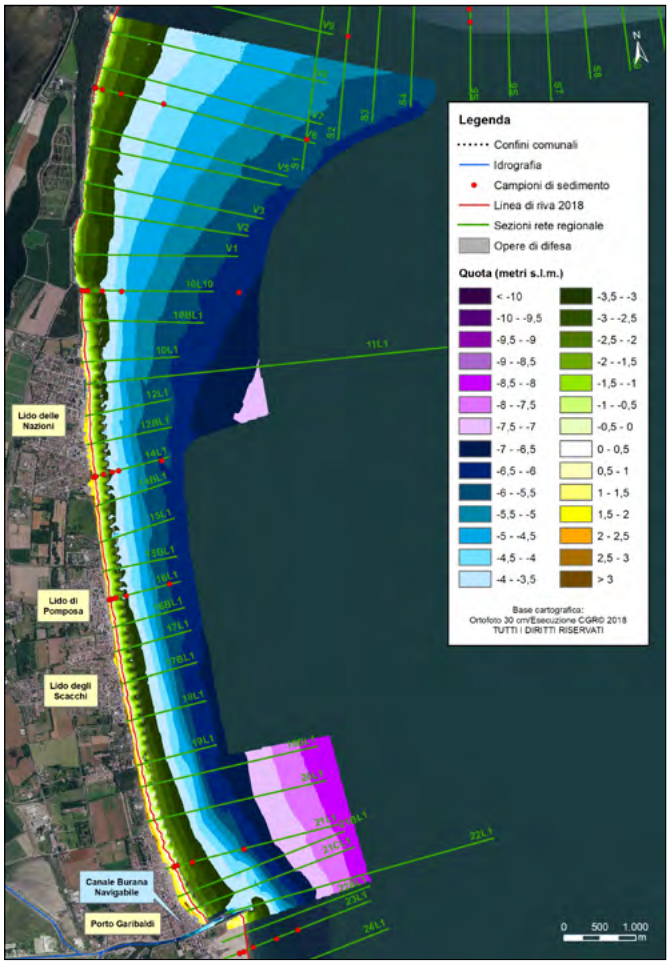
La Regione Emilia-Romagna ha già finanziato la 7ª campagna topo-batimetrica regionale, che verrà realizzata dalla Direzione Tecnica di Arpae nel 2024.

È importante puntualizzare che lo schema di rilievo utilizzato nelle campagne topo-batimetriche regionali (dettaglio per la zona Porto Garibaldi – Volano in Figura 3b) viene utilizzato come base di partenza per tutti i Piani di monitoraggio effettuati da Arpae con sezioni di raffittimento specifiche in base al caso di studio.

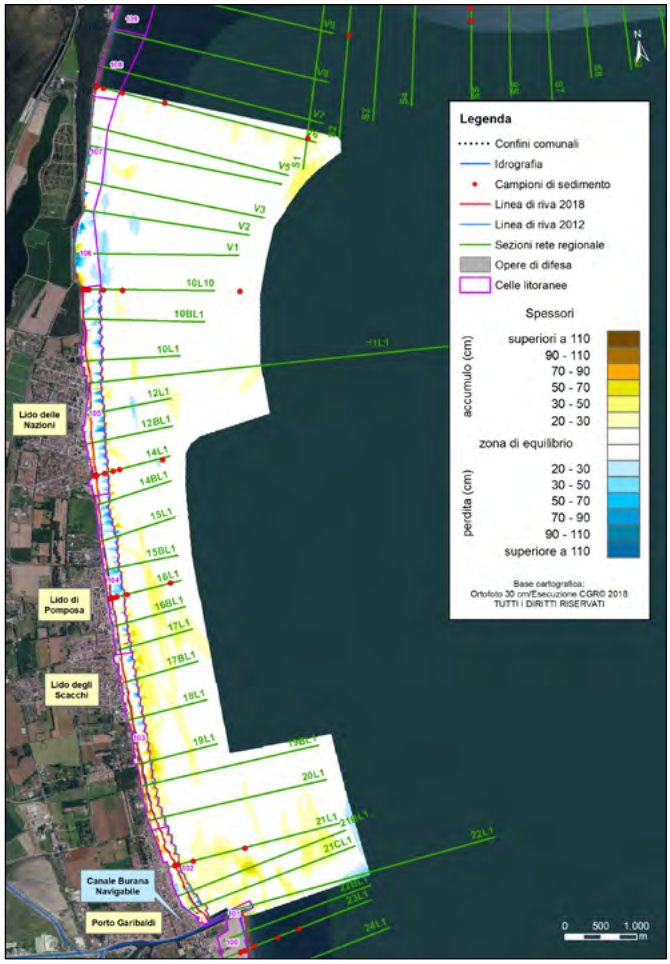
Per quanto riguarda la metodologia risulta di fondamentale importanza l'inquadramento geodetico che viene effettuato a partire sempre dalla stessa infrastruttura: la Rete geodetica costiera (RGC). Grazie alla coerenza dei riferimenti plano-altimetrici viene garantita la confrontabilità dei rilievi all'interno di un range di errore centimetrico.



a)



b)



c)

Figura 3. a) Confronto tra i profili 2012 e 2018 relativi alla Sezione 19BL1 Lido degli Scacchi (C103). b) Porto Garibaldi – Volano: carta topo-batimetrica e punti di campionamento dei sedimenti (2018). c) Porto Garibaldi – Volano: carta degli accumuli e delle perdite di sedimento 2012-2018 e punti di campionamento 2012 (Arpae, 2020).

Il rilievo topografico viene effettuato con ricevitori satellitari GNSS, in modalità RTK con stazione di riferimento (master) e stazione ricevente (rover) per la ricezione della correzione differenziale (trasmissione GSM o radio). Le sezioni vengono battute mediamente con un punto ogni 2-4 m e a ogni cambio di pendenza significativo.

Il rilievo batimetrico viene realizzato tramite ecoscandaglio multibeam (MBES) installato su idonea imbarcazione equipaggiata con tutta la strumentazione necessaria per la correzione del dato acquisito.

Nelle sole zone a basso fondale viene utilizzato un sistema singlebeam (SBES) che può essere installato su imbarcazioni con ridotto pescaggio. Entrambi i sistemi devono necessariamente essere calibrati giornalmente tramite procedura di Bar-check e in continuo con sonda di misura della velocità del suono in acqua.

Le tre tipologie di rilievo (asta GNSS, SBES e MBES) devono avere delle zone di sovrapposizione ad ulteriore conferma dell'affidabilità del dato.

3.2.2. Linea di riva

La linea di riva è "l'elemento più immediato per una prima valutazione dello stato e dell'evoluzione di una spiaggia bassa e sabbiosa" (Arpae, 2016) tuttavia le analisi dello stato dei litorali basate esclusivamente su questo parametro comportano una serie di problematiche, legate sia alla metodologia che alla sua significatività.

In passato il rilievo della linea di riva veniva effettuato principalmente mediante fotointerpretazione delle ortofoto georeferenziate attraverso l'individuazione di indicatori indiretti come il limite bagnato/asciutto, un elemento quindi molto variabile a seconda della risoluzione delle ortofoto e del momento di ripresa delle stesse. Nell'ambito della 4ª campagna di monitoraggio del 2006 la linea di riva è stata ottenuta sia da fotointerpretazione che tramite rilievo GNSS, metodologia quest'ultima attraverso la quale è possibile individuare e tracciare lo zero ortometrico (0 m s.l.m.) e che è stata adottata ufficialmente anche nelle successive campagne (2012 e 2018).

Inoltre, a causa degli interventi antropici di gestione e manutenzione del litorale sempre più diffusi e consistenti questo parametro, da solo, non è più sufficiente per l'analisi dell'evoluzione della spiaggia (Arpa, 2008). Per tale ragione nelle ultime tre campagne di monitoraggio le valutazioni sullo stato delle spiagge e loro evoluzione sono state effettuate sulla base di due indicatori, ASE e ASPE (descritti nel dettaglio successivamente), che pur tenendo in considerazione le variazioni della linea di riva considerano come parametro maggiormente significativo le variazioni di volume.

3.3 Rete di monitoraggio sedimentologico

Nel monitoraggio dell'erosione costiera, il dato sedimentologico è indicativo dell'ambiente deposizionale, quindi delle condizioni idrodinamiche che si determinano localmente e dell'energia in gioco. La distribuzione granulometrica dipende dalla natura del sedimento (caratteristiche petrografiche dei bacini di provenienza), dalla distanza dalle zone di alimentazione (foci fluviali), dalla morfologia dei fondali, dall'azione del moto ondoso e dalle correnti lungo costa, nonché dagli interventi antropici, quali costruzione di opere e ripascimenti artificiali.

Sono tre le campagne sedimentologiche regionali condotte in concomitanza con i rilievi della rete di monitoraggio topo-batimetrico e quindi nell'ambito dei rilievi delle reti di monitoraggio costiero gestite da Arpae:

- la prima, condotta nel 1993 da Idroser (poi confluita in Arpae), nell'ambito del Piano Costa 1996 (156 campioni) (Regione Emilia-Romagna, 1996).
- la seconda, nel giugno-luglio 2012, ad integrazione della quinta campagna topo-batimetrica della costa regionale. Il monitoraggio è consistito nel prelievo di 300 campioni di sedimento, di cui 130 raccolti alle stesse coordinate del 1993 e 170 su nuovi punti di campionamento (principalmente individuati su spiaggia emersa o su sezioni della rete topo-batimetrica su litorali con tendenza erosiva non ancora indagati) (Arpae, 2016).
- la terza, nell'agosto-ottobre del 2018, nell'ambito della seconda campagna di monitoraggio del "Progettone 3" (Messa in sicurezza di tratti critici del litorale regionale mediante ripascimento con sabbie sottomarine). Sono stati raccolti 370 campioni, di cui 300 prelevati sulle stesse coordinate della campagna del 2012 e i restanti 70 necessari per le indagini localizzate sulle spiagge oggetto di ripascimento (Arpae, 2020).

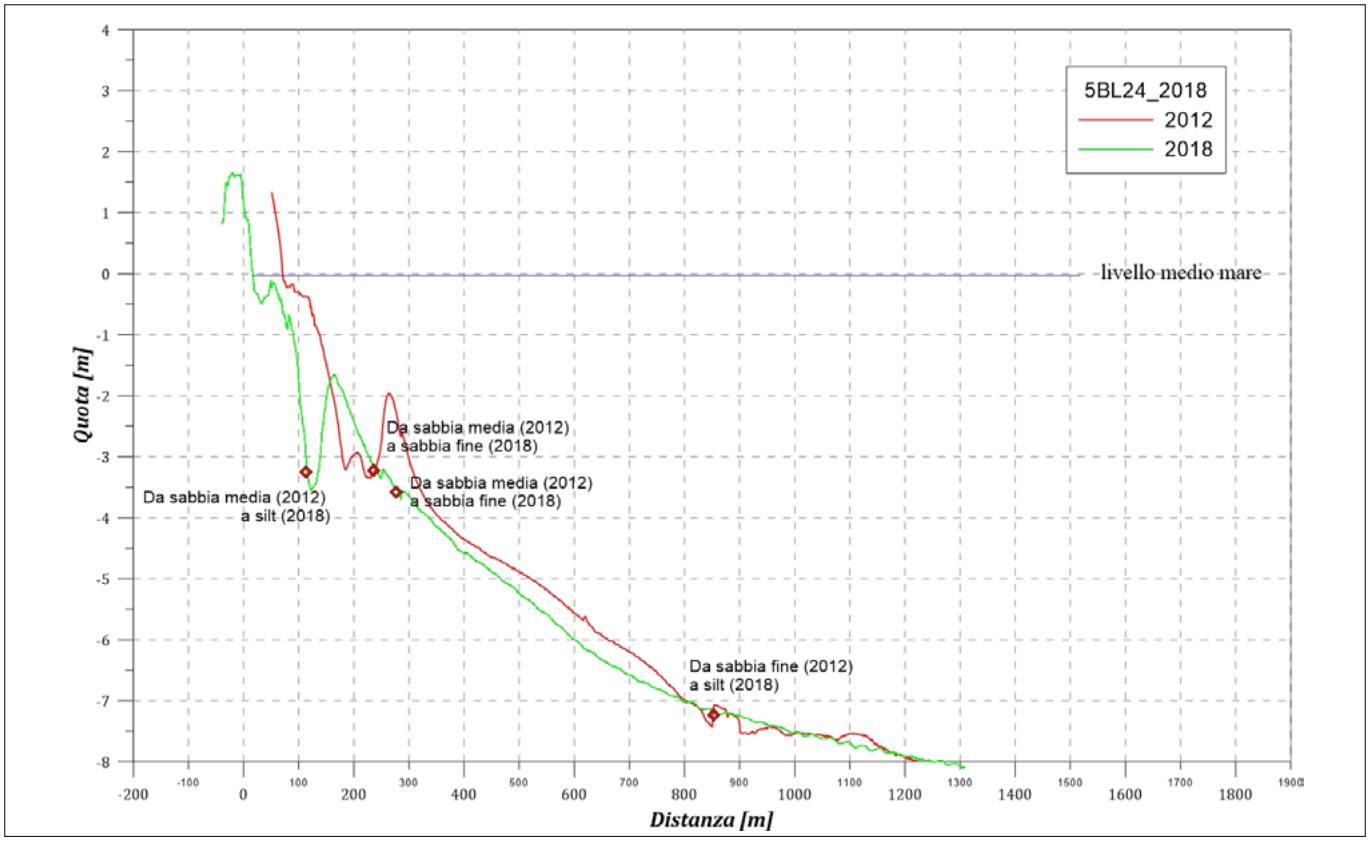
A queste tre si aggiunge, quale riferimento di base, la campagna regionale condotta dall'Università di Ferrara tra il 1971 e il 1972 (330 campioni da Volano a Cattolica) (Bondesan *et al*., 1978; Dal Cin *et al*., 1979).

Nel 2024 sarà effettuata la 4ª campagna sedimentologica regionale che consisterà di 474 campionamenti, dei quali 306 prelevati sugli stessi punti delle precedenti campagne e 168 di nuovo disegno. La maggior parte di questi nuovi punti sono stati inseriti poiché necessari nell'ambito del monitoraggio triennale che riguarderà le spiagge oggetto di ripascimento nel 2022 "Progettone 4" mentre 36 punti sono stati individuati in corrispondenza delle principali foci fluviali (Conca, Marecchia, Uso, Rubicone, Savio, Bevano, Fiumi Uniti, Lamone, Reno, Po di Goro) per un maggior approfondimento.

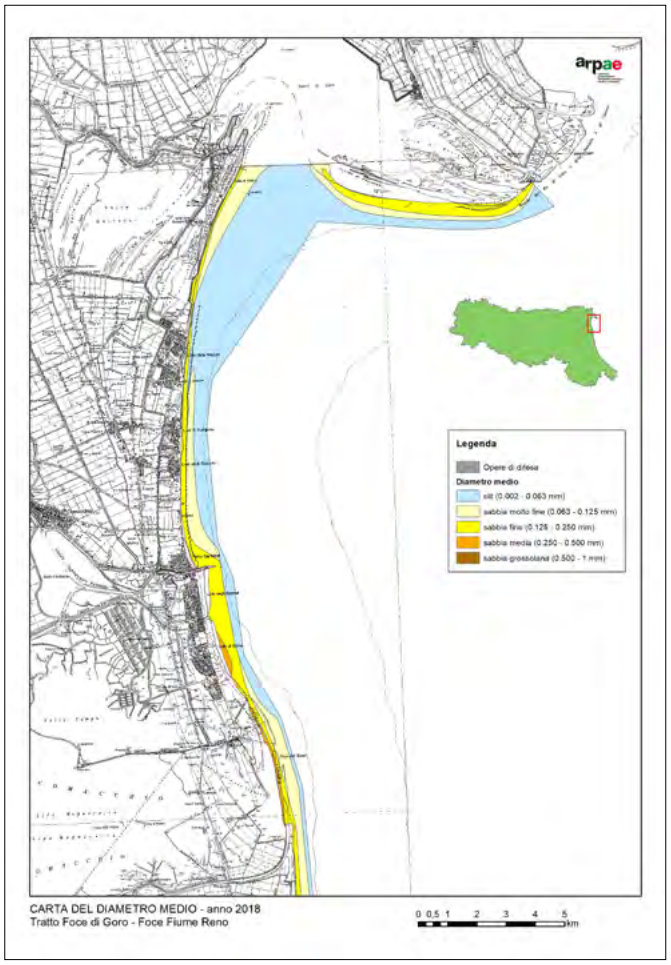
Anche in questo caso, è importante puntualizzare che il disegno di campionamento utilizzato nelle campagne sedimentologiche regionali viene utilizzato come base di partenza per tutti i Piani di monitoraggio effettuati da Arpae con integrazioni specifiche di punti di campionamento in base al caso di studio.

Per quanto riguarda le metodologie e la strumentazione si procede alla raccolta tramite sessola o benna Van Veen su spiaggia emersa e sommersa rispettivamente, registrando la posizione di campionamento reale tramite asta GNSS o SBES.

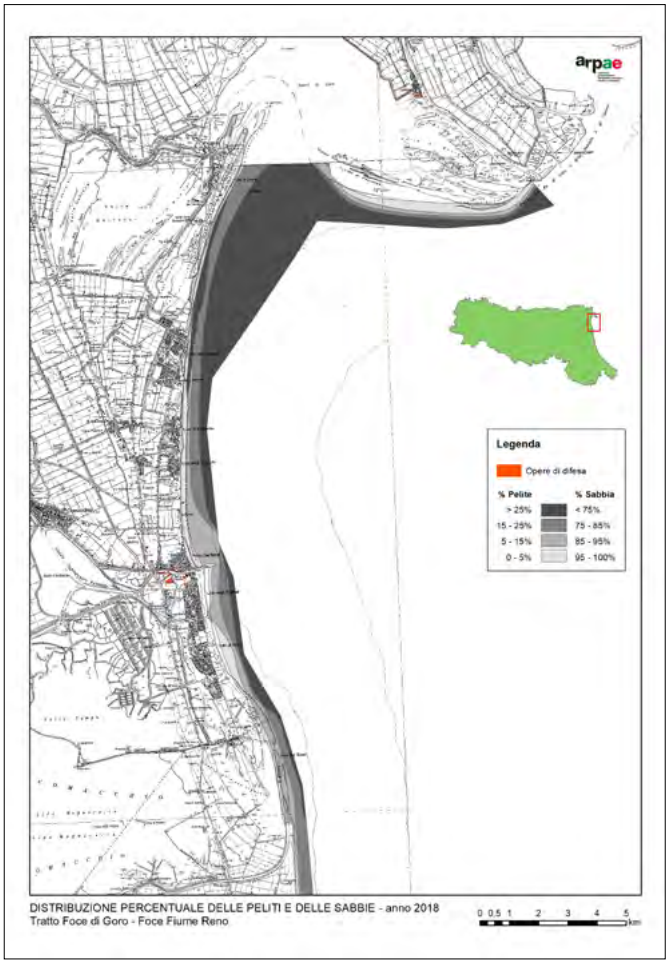
I campioni vengono affidati a laboratori specializzati, come il Laboratorio Multisito Arpae, per le analisi granulometriche, i cui risultati sono poi analizzati per il calcolo dei principali parametri sedimentologici (tessitura, distri-



a)



b)



c)

Figura 4. a) Confronto del Diametro medio tra il 212 e il 2018, in relazione alle modifiche morfologiche. b) Carta del diametro medio anno 2018. Tratto Foce di Goro - Foce Fiume Reno. c) Distribuzione percentuale delle peliti e delle sabbie anno 2018. Tratto Foce Goro - Foce Fiume Reno (Arpae, 2020).

buzione granulometrica, diametro medio, coefficiente di cernita, frazione pelitica), relativi confronti temporali (Figura 4a) e restituzione cartografica (Figura 4b-c).

3.4 Rete di monitoraggio della subsidenza costiera

Il fenomeno dell'abbassamento del suolo, o subsidenza, si manifesta in termini significativi, nella parte nord della fascia costiera regionale, a partire dagli anni '30 - '40 del secolo scorso. Negli anni '50 la subsidenza investe anche il territorio della provincia di Ravenna. Negli anni '60 si verifica un ulteriore spostamento verso sud del fenomeno fino ad interessare tutta l'area costiera riminese.

Lo studio del fenomeno evidenzia come l'abbassamento del suolo non si limita alle sole terre emerse, ma interessa anche la spiaggia sommersa.

L'entità degli abbassamenti risulta in quel caso di difficile definizione in quanto fino al 1980, la subsidenza del territorio costiero era stata misurata con livellazioni eseguite da diversi Enti, con metodologie e caposaldi di riferimento diversi tra loro come l'IGM e il Catasto.

Al fine di verificare gli sviluppi della subsidenza, nel 1983 venne istituita, per conto della Regione Emilia-Romagna, una rete di caposaldi che garantiva una copertura uniforme del territorio costiero e ne fu eseguita la prima misura nel 1984. La rete si sviluppava da Cattolica (RN) a Gorino (FE) e il caposaldo di riferimento era posto a Pennabilli, nell'Appennino Riminese.

Nel 1987 si svolse la 2ª campagna di livellazione, sullo stesso percorso della precedente e al termine dei calcoli di compensazione si determinarono, nell'area costiera, valori di subsidenza decisamente elevati, compresi tra i 20 e i 50 mm/y.

Nel 1993 è stata istituita e misurata una nuova rete di misura della subsidenza lungo la costa regionale. La rete aveva una lunghezza complessiva di circa 450 km e contava oltre 560 capisaldi distribuiti su 16 poligoni. Anche in questo caso il riferimento è stato il caposaldo di Pennabilli. La disponibilità di 3 campagne di livellazione (1984, 1987 e 1993) ha consentito di meglio definire il trend evolutivo della subsidenza lungo la fascia costiera.

L'intensificarsi del fenomeno della subsidenza per cause antropiche, come riportato nel precedente paragrafo, ha indotto nel 1997-1998 la regione Emilia-Romagna a dotarsi di una rete regionale di monitoraggio della subsidenza, progetta da Arpa in collaborazione con il Dicam (Dipartimento di ingegneria civile, ambientale e dei materiali) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna.

La rete regionale di controllo della subsidenza era costituita inizialmente da oltre 2300 capisaldi di livellazione geometrica di alta precisione e da circa 60 punti GPS periodicamente rilevati.

Successivamente, nella campagna dal 2005-2007, l'analisi della subsidenza tramite livellazione è stata integrata dall'analisi interferometrica di dati radar satellitari con tecnica PSInSARTM.

Un'ulteriore evoluzione della rete si è avuta con il "Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola" 2011-2012, per i quali si è fatto ricorso alla sola analisi interferometrica (tecnica SqueeSARTM) supportata per la calibrazione da 17 stazioni GNSS permanenti, con l'abbandono della livellazione.

Nel 2016 si è proceduto ad aggiornare le conoscenze geometriche sul fenomeno della subsidenza nel periodo 2011-2016, migliorando la tecnica interferometrica adottata in precedenza.

Il passaggio dalla livellazione di precisione alle tecniche interferometriche da dati satellitari ha permesso di acquisire un'informazione molto più diffusa e capillare sull'intero territorio regionale (circa 2 milioni di punti), ottenendo così un grigliato (100 m x 100 m) delle velocità di movimento verticale sull'intero territorio di pianura della regione e la relativa Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo di riferimento. Le Carte sono rappresentate tramite isocinetiche con passo di 2,5mm/anno in linea con la precisione della metodologia di ± 2 mm/anno (Figura 5).

L'ultima analisi effettuata per il periodo 2011-2016 ha evidenziato che gran parte del territorio (79%) non presenta variazioni di tendenza, mentre il 18% della superficie evidenzia una riduzione della subsidenza. Nello specifico sulla zona costiera sono stati rilevati tassi di subsidenza in linea con i tassi naturali (2-3 mm/anno), tranne che per la zona di Lido di Dante (17 mm/anno) e Lido Adriano (11 mm/anno), dove si riscontrano tassi maggiori (Arpae, 2018).

Sono in corso analisi interferometriche satellitari per la valutazione del tasso di subsidenza del periodo 2016-2021.

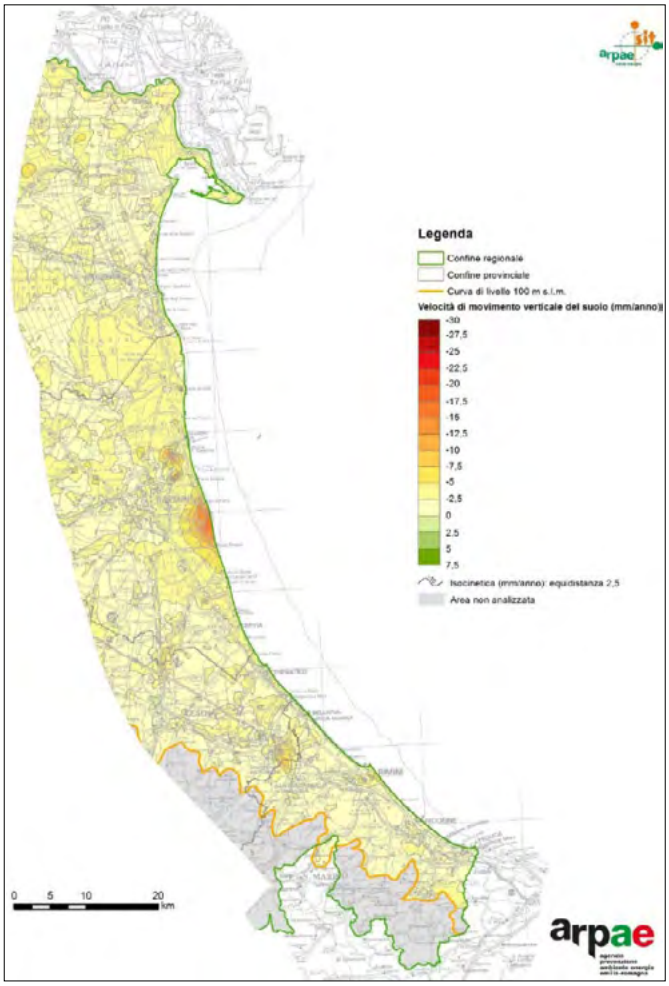


FIGURA 5. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016. Litorale. (Arpae, 2018).

3.5 Rete di monitoraggio dello stato del mare

3.5.1. Moto ondoso

Lo studio della dinamica marina è finalizzato a fornire elementi per stimare quali effetti il moto ondoso e le correnti, ad esso associate, abbiano sui fondali in termini di possibili movimentazione dei sedimenti e quali interazioni si possono avere con le strutture artificiali presenti e con nuovi assetti morfologici delle spiagge determinati da interventi di ripascimento.

Per individuare la dinamica litoranea e le modificazioni della morfologia della spiaggia emersa e sommersa, occorre partire da dati ondametrici rappresentativi delle condizioni meteo-marine del tratto di mare antistante i litorali in studio, per arrivare alla definizione delle condizioni del moto ondoso incidente, relative sia al regime medio annuo sia agli eventi estremi che possono interessare la costa.

La disponibilità di dati ondametrici in corrispondenza delle coste della Regione Emilia-Romagna è risultata, in passato, piuttosto varia, sia come tipologia delle stazioni di misura, sia come estensione temporale delle serie storiche.

L'occasione di installare una boa ondametrica davanti al litorale regionale è stata colta grazie al progetto europeo Beachmed-e (2006), che ha messo a disposizione una parte dei finanziamenti necessari all'operazione. Una significativa quota di finanziamento fu fornita autonomamente da Arpa (ora Arpae), partner del progetto europeo. L'installazione della boa, denominata Nausicaa, è avvenuta il 23 maggio 2007, in corrispondenza di un fondale di circa 10 m (Figura 6).

Grazie alla gestione operata da Arpae, la boa Nausicaa ha continuato a funzionare, pur con le inevitabili interruzioni causate da malfunzionamenti e dalla attività di manutenzione, fino all'estate del 2021 durante la quale le interruzioni sono aumentate, fino al mese di settembre dello stesso anno, quando la boa ha interrotto definitivamente la trasmissione dei dati.

Arpae ha così avviato le procedure per sostituire la boa Nausicaa con una nuova, usufruendo delle risorse finanziarie messe a disposizione dal progetto europeo strategico AdriaClim del Programma di cooperazione transfrontaliera Italia-Croazia.

La nuova boa ondametrica di Arpae Emilia-Romagna, denominata Nausicaa2, è stata installata al largo di Cesenatico il 13 ottobre 2022, nei pressi dell'area in cui operava la precedente boa ondametrica e i primi dati sono stati archiviati a partire dal successivo mese di dicembre.

La boa Nausicaa2 è il modello DWR-4 ACM della ditta olandese Datawell, ha un diametro di 0,7 m ed è equipaggiata con doppia alimentazione (batterie e pannelli solari), doppio sistema di trasmissione dati (radio e GPRS) e antenna per la misura della temperatura dell'aria a 2 metri.

Come la precedente boa ondametrica Nausicaa, la nuova strumentazione misura in tempo reale le caratteristiche del moto ondoso (altezza, periodo, direzione), della corrente superficiale, della temperatura dell'acqua e dell'aria. I dati, acquisiti ogni 30 minuti, sono trasmessi al sistema ricevente a terra situato presso la Struttura oceanografica Daphne di Arpae, a Cesenatico; da qui vengono inviati e archiviati nel Database della Struttura IdroMeteoClima e scaricabili tramite il servizio web Dexter di Arpae-SIMC.

La serie storica di dati ondametrici, disponibile a partire dall'installazione della prima boa Nausicaa nel 2007 e considerando la pausa tecnica necessaria per varare la seconda boa Nausicaa2, presenta una notevole copertura, attestandosi su oltre l'85% dei dati teoricamente rilevabili.

3.5.2. Marea

Gli innalzamenti del livello marino di una certa consistenza, in concomitanza con eventi di mareggiata, possono determinare l'intensificazione degli effetti erosivi sulla spiaggia da parte delle onde incidenti oltre, ovviamente, alla possibilità di determinare l'allagamento di aree di retro spiaggia.

Lungo il litorale regionale sono presenti tre stazioni mareografiche caratterizzate da periodi significativi di funzionamento, ovvero la stazione mareografica di Porto Corsini (RA), appartenente alla Rete Mareografica Nazionale, il mareografo del porto di Rimini, installato dalla Società Hera e la stazione mareografica integrata di Porto Garibaldi (FE), gestita da Arpae.

Per l'analisi degli effetti dell'innalzamento del livello del mare durante le mareggiate davanti al litorale regionale, si fa riferimento ai dati forniti dal mareografo di Porto Garibaldi.

Figura 6. Localizzazione e trasporto della boa della prima boa Nausicaa al largo di Cesenatico nel 2007.

La stazione, installata nel mese di giugno del 2009 dall'Università di Ferrara per conto della Provincia di Ferrara, è passata in gestione ad Arpae a seguito del trasferimento di parte delle funzioni della Provincia. Il mareografo è collocato in prossimità della testa del molo nord del porto, all'interno di un'apposita cabina, poggiata su una piattaforma sostenuta da pali. Questa disposizione garantisce una profondità dell'acqua sottostante di almeno 3,5 m (Figura 7).

FIGURA 7. La stazione mareografica di Porto Garibaldi collocata in prossimità della testa del molo Nord del porto canale.

La stazione è dotata di due mareografi distinti per avere una misura precisa del livello del mare e di una stazione GNSS permanente, che misura costantemente la quota della piattaforma, per poter discriminare il fenomeno della subsidenza. La dotazione strumentale della stazione è composta da: mareografo radar, mareografo a galleggiante, stazione permanente GNSS, stazione metereologica (anemometro, pluviometro, termometro, barometro), sonda multiparametrica per il monitoraggio dell'acqua. I dati sono registrati ogni 10 minuti e sono disponibili alla consultazione tramite il servizio web Dexter di Arpae-SIMC.

Nell'arco di circa 14 anni di funzionamento, il rendimento raggiunto dalla stazione mareografica è risultato molto alto: i dati di livello del mare disponibili risultano oltre il 95% di quelli teoricamente ottenibili con una cadenza di 10 minuti.

4. INDICATORI DI STATO DELL'EROSIONE ASE E ASPE

La complessità di fattori che agiscono sull'evoluzione della costa emiliano-romagnola ha determinato nel tempo la necessità di definire degli indicatori attraverso i quali ottenere una informazione sintetica per descrivere lo stato di fatto di un tratto costiero e la sua evoluzione nel tempo. Le variazioni della linea di riva, le variazioni di volume della spiaggia emersa e sommersa, la subsidenza, i ripascimenti, i prelievi e le opere rigide vanno a determinare un quadro in cui l'analisi integrata diventa indispensabile per il corretto studio di un tratto costiero, dove una perdita di volume o un avanzamento della linea di costa possono essere causati sia da processi naturali che da interventi antropici.

A tale scopo, potendo disporre di una quantità significativa di dati derivanti dalle campagne topo-batimetriche regionali (dal 2000 rilevate ogni 6 anni) sono stati messi a punto e introdotti nel monitoraggio della costa emiliano-romagnola due indicatori, ASE e ASPE (Aguzzi *et al*., 2012).

Entrambi gli indicatori fanno riferimento ad unità territoriali dette "macrocelle", segmenti di costa di lunghezza variabile tra i 15 e i 30 km, caratterizzati da bilancio sedimentario indipendente. Le macrocelle sono formate da una serie unità elementari di gestione dette "celle", tratti costieri di lunghezza variabile da poche decine di metri ad alcuni chilometri caratterizzate da evoluzione della spiaggia emersa e sommersa uniforme e strettamente dipendente dagli interventi di difesa effettuati nel tempo. Le celle e le macrocelle sono state introdotte come unità di riferimento, alle diverse scale, dallo studio Arpa, 2008 e in seguito rielaborate nell'ambito del progetto europeo Coastance ed utilizzate nel 'SICELL - Il sistema gestionale delle celle litoranee' (Regione Emilia-Romagna, 2011). Attualmente il litorale regionale è suddiviso in 7 macrocelle e 118 celle unitarie.

Sempre a partire dagli studi effettuati in Arpa, 2008 sono state definite delle soglie di variazione significativa, sui 6 anni intercorsi tra i due rilievi della rete, comuni ai due indicatori:

- 30 m^3/m di variazione di volume di sedimento eroso e/o depositato
- 10 m di avanzamento/arretramento della linea di riva, su un tratto di 100 metri.

In sintesi, tramite gli indicatori ASE e ASPE, calcolati per ognuna delle celle litoranee del sistema SICELL, è possibile valutare lo stato del litorale dell'Emilia-Romagna, e di individuare i tratti in stato critico per i quali prevedere ulteriori interventi di gestione e difesa.

Inoltre, ASE e ASPE sono entrati a fare parte dell'insieme degli indicatori, sviluppati secondo il modello DPSIR, del tema ambientale Rischi costieri del report "Dati ambientali dell'Emilia-Romagna".

4.1. ASE (Accumulo, Stabile, Erosione)

Il primo indicatore, ASE, "fornisce indicazioni sullo stato del litorale così come si presenta dopo essere stato oggetto di interventi di protezione" (Aguzzi *et al*, 2012). Non tiene quindi in considerazione le cause delle variazioni registrate anche se, essendo basato su variazioni di volume oltre che sulla variazione della linea di riva, risulta più consistente come indicatore rispetto ad esempio alla sola linea di riva, dove questa perde di rappresentatività soprattutto nei litorali soggetto a continui interventi antropici.

L'ASE descrive la costa in base a tre classi: accumulo, stabile o erosione (Figura 8).

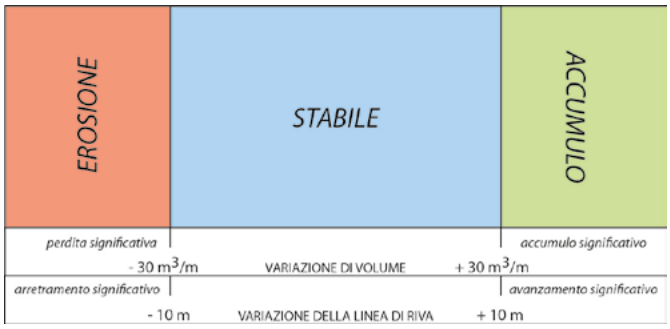


FIGURA 8. Schema dell'indicatore ASE (Aguzzi *et al*, 2012).

L'analisi è effettuata al lordo dei volumi di ripascimento apportati sul singolo tratto e non considera la presenza di opere di difesa, in tal modo l'indicatore evidenzia gli effetti prodotti dagli interventi effettuati e quindi è possibile valutarne l'efficacia.

4.2. ASPE (Accumulo, Stabile, equilibrio Precario, Erosione)

L'ASPE, "ha lo scopo di fornire il quadro del reale stato di criticità della costa e descrive il litorale così come si presenterebbe se non venissero effettuati gli interventi di difesa" (Aguzzi *et al.*, 2012) e per tanto descrive lo stato reale di criticità del tratto in questione. L'analisi viene effettuata prendendo in considerazione lo stato delle opere di difesa presenti ed escludendo eventuali apporti/prelievi di sedimento.

L'ASPE descrive la costa in base a quattro classi: accumulo, stabilità, equilibrio precario o erosione (Figura 9).

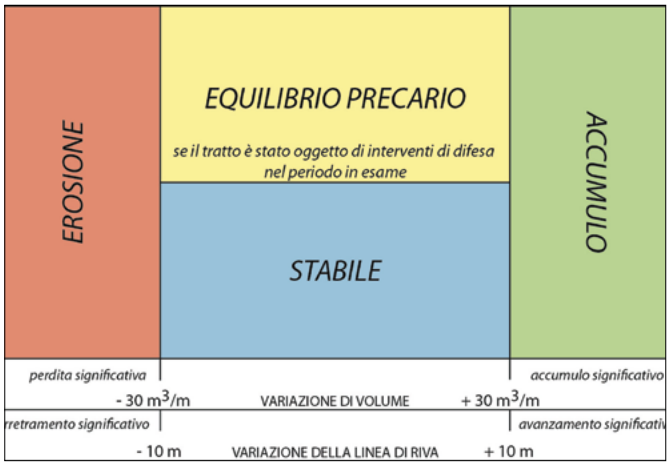


Figura 9. Schema dell'indicatore ASPE (Aguzzi *et al*, 2012).

Erosione ed accumulo sono individuati, come nell'ASE, in base al superamento delle soglie individuate. Per i tratti che non mostrano erosione o accumulo significativi, l'indicatore distingue tra spiagge realmente stabili (non sono stati effettuati interventi di difesa nel periodo di tempo considerato) e tratti in equilibrio precario (sono stati effettuati interventi nel periodo di riferimento in assenza dei quali il tratto sarebbe in erosione).

5. SICELL - IL SISTEMA GESTIONALE DELLE CELLE LITORANEE

Il Sistema gestionale delle celle litoranee (SICELL), Figura 10, è stato sviluppato nel 2010 nell'ambito del progetto europeo COASTANCE (Programma Interreg-MED) come strumento informativo di supporto alla gestione e difesa della costa, grazie alla riorganizzazione di banche dati e informazioni in massima parte già esistenti e costantemente aggiornati nel sistema informativo regionale.

Nel quadro delle numerose criticità che insistono sulle coste basse e sabbiose, per gestire i tratti costieri più esposti e in generale per il mantenimento in equilibrio del sistema costiero regionale, è necessaria una gestione ottimale dei sedimenti litoranei, una diversificazione delle fonti (scavi edili, dragaggi portuali e fluviali, accumuli litoranei, tutto quanto possa concorrere a gestire i tratti in erosione) e un efficientamento delle pratiche di dragaggio e ripascimento in funzione delle distanze fra le zone di prelievo e quelle di destinazione. Il SICELL e la suddivisione del territorio in celle litoranee sono funzionali a queste necessità di ottimizzazione.

Il SICELL è funzionale anche ad un approccio complessivo ed integrato messo a punto dalla Regione che considera i sedimenti come risorsa strategica e che si basa su due pilastri: 1) l'alimentazione del sistema costiero, 2) la riduzione delle perdite dal sistema. Al primo fanno capo le politiche per favorire il ripristino del trasporto solido fluviale, l'utilizzo delle fonti esterne di sedimenti (depositi sottomarini, materiali provenienti da scavi edili, da ampliamento di bacini portuali), e delle fonti interne (accumuli presso moli e bocche portuali, foci e barre di foce fluviali, opere di difesa rigide, ecc.) ai fini della manutenzione dei tratti litoranei più critici. Al secondo pilastro fanno capo sia la corretta gestione dei sedimenti di spiaggia (corretta esecuzione degli argini invernali di protezione, utilizzo di trappole eoliche, corretta pulizia delle spiagge con vagliatura in sito), sia le politiche per la riduzione della subsidenza (riduzione dei prelievi di acque sotterranee e di idrocarburi, misure di mitigazione come la re-immissione di fluidi nel sottosuolo o altre misure compensative).

Nel tempo si sono aggiunte le informazioni sulla sedimentologia, l'individuazione dei "tratti litoranei significa-

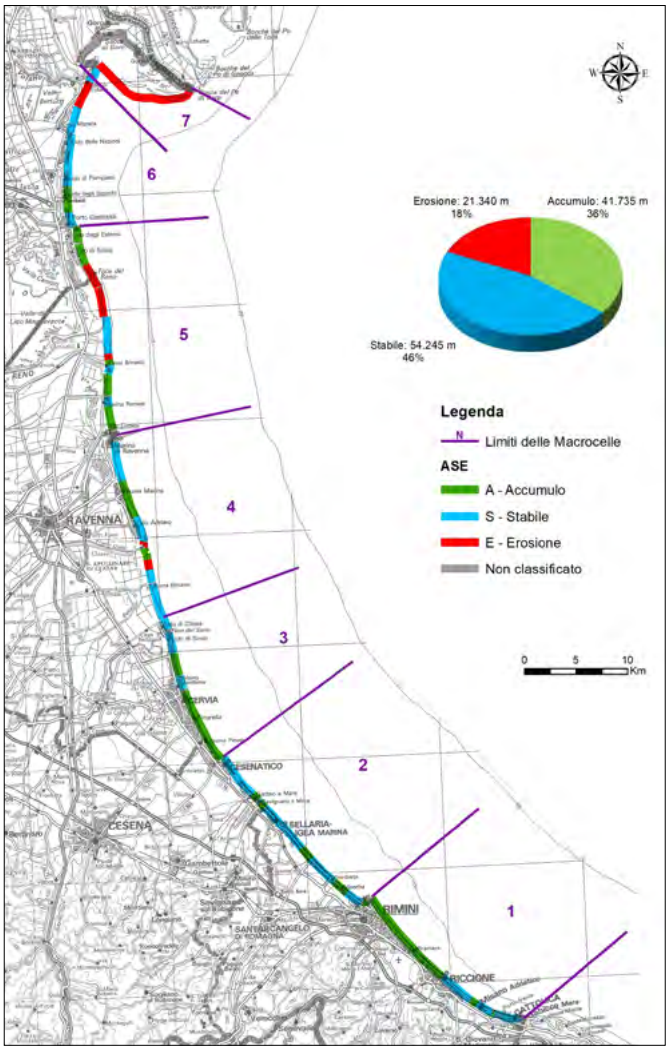


Figura 10. Limiti delle sette macrocelle del sistema SICELL (Arpae, 2020).

tivi ai fini gestionali" e la suddivisione delle celle corrispondenti a imboccature portuali e foci dei corsi d'acqua in due sotto unità, una di pertinenza marina una di pertinenza interna. Tali nuovi elementi sono stati introdotti ai fini di un'ipotesi di specifica regolamentazione delle autorizzazioni alla movimentazione dei sedimenti.

La corretta gestione degli accumuli litoranei, così come dei depositi off-shore o di altre fonti esterne al sistema litoraneo, è diventata negli anni un fattore determinante per ottimizzare le risorse e per difendere la costa dal fenomeno erosivo e dal rischio di ingressione marina in maniera sostenibile e integrata, tanto che è entrata a far parte, insieme ad altri fattori, come sistema di azioni e indirizzi operativi nella nuova Strategia regionale di Gestione Integrata per la Difesa e l'Adattamento della Costa ai cambiamenti climatici (GIDAC).

6. IL SISTEMA INFORMATIVO DEL MARE E DELLA COSTA (SIC)

Oltre ai monitoraggi sistematici dei fenomeni e delle dinamiche costiere a scala regionale precedentemente descritti, la gestione della costa si basa su un sistema complesso di conoscenze che includono attività quali:

- esecuzione di rilievi laserscanner e di altri monitoraggi sperimentali per gli approfondimenti sulle dinamiche costiere;
- indagini geognostiche e studi sulla geologia dell'interfaccia terra mare;
- elaborazione di cartografie tematiche e dei rischi;
- sviluppo e la gestione delle banche dati.

Gli strumenti fondamentali per la gestione dei dati, lo sviluppo dei quadri conoscitivi e l'analisi degli scenari di rischio e di adattamento, sono infatti le banche dati. Per questo motivo a partire dal 2002 è stato implementato il Sistema Informativo del Mare e della Costa (SIC), diventato strumento istituzionale con le Linee Guida GIZC (D.G.R. 20 gennaio 2005, n.645) (Perini *et al.*, 2007).

Il riferimento iniziale è costituito dalle raccomandazioni ICZM 2002/413/CE e dal programma EUROSION. In seguito, lo strumento è stato aggiornato per rispondere alle nuove sfide, alle nuove strategie e direttive Europee, Nazionali e Regionali quali:

- Direttiva alluvioni (DIR EU 2007/60 - recepita nell'ordinamento nazionale con d.lgs. 49/2010) - e il relativo Piano di Gestione del rischio alluvioni che, tra le sue misure, ha previsto l'elaborazione della strategia GIDAC Regionale;
- Strategia per la mitigazione e l'adattamento della Regione Emilia-Romagna (SRCC);
- Direttiva europea per la Pianificazione dello Spazio Marittimo (DIR EU 49/2014- recepita a livello nazionale con d.lgs. 201/2016), nonché per supportare il Sistema Regionale di Allertamento rispetto ai fenomeni da mareggiata (DGR 1761/2020).

Attualmente il Sistema Informativo del mare e della costa si articola in sette banche-dati tematiche di seguito elencate in Figura 11, che riguardano lo stato fisico del litorale, i rischi costieri e le risorse della fascia marino-costiera. Altre banche dati sono in fase embrionale.

Oltre ai servizi webgis disponibili per alcune delle banche dati sopra elencate, raggiungibili dalla pagina Cartografia interattiva e banche dati dell'Area geologia, suoli e sismica, che permettono la consultazione dei dati cartografici online, molte informazioni sono scaricabili tramite servizi WMS e WFS, accessibili attraverso la piattaforma MinERva, portale di condivisione delle banche dati e delle

FIGURA 11. Articolazione delle sette banche dati tematiche del SIC.

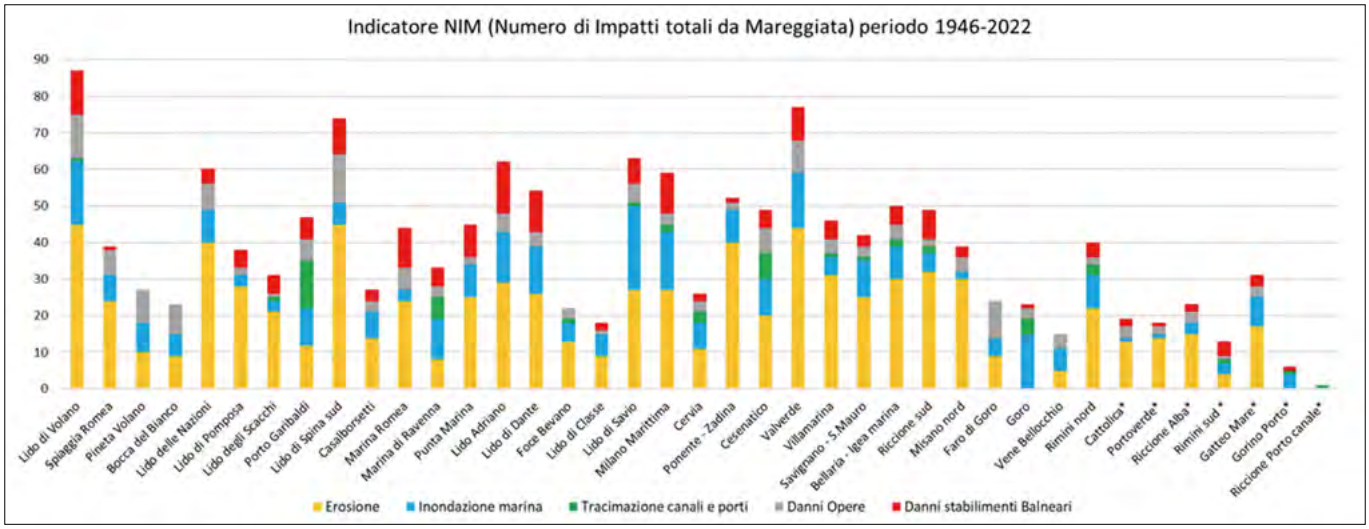


Figura 12. Distribuzione dell'indicatore NIM e tipologia di impatto per località - periodo 1946-2022.

informazioni detenute dalla Direzione Generale Cura del Territorio ed Ambiente della Regione Emilia-Romagna.

Al fine di supportare il processo di 'pianificazione dello spazio marittimo', in corso ai sensi della direttiva EU 89/2014, la Regione insieme agli altri partner del progetto EU Portodimare, ha inoltre sviluppato il Geoportale Adriatico-Ionio (GAIR).

Un dettaglio sulle banche dati ed i relativi contenuti è consultabile nel Quadro conoscitivo della Strategia GIDAC.

Tra le banche dati sopra citate, *in_Storm* svolge un ruolo fondamentale nel monitoraggio delle dinamiche costiere e dei processi associati agli eventi meteo marini avversi. In essa sono archiviati ed elaborati tutti i dati relativi agli eventi che producono danni lungo le coste regionali.

Gli impatti vengono geolocalizzati e classificati sulla base delle 5 tipologie prevalenti: l'erosione dei litorali, che rappresenta il 53% degli impatti registrati dal 1946 al 2022, l'inondazione marina (il 20%), i danni agli stabilimenti balneari (12%), i danni alle opere di difesa costiera (11%) e la tracimazione di porti e canali (il 4%), Figura 12.

6.1 Rilievi morfologici tramite laser-scanner

L'avvento delle tecnologie di rilievo altimetrico *laser-scan,* disponibili dai primi anni 2000, ha consentito un notevole miglioramento della conoscenza e del monitoraggio delle morfologie costiere, grazie all'acquisizione in tempi molto rapidi di nuvole di dati plano altimetrici (ENH) molto densi, dai quali, in post-processing, si ottengono il Modello Digitale di Superficie (*DSM-Digital Surface Model*) e il Modello Digitale del Terreno (*DTM-Digital Elevation Model*). Per questi motivi, nell'ambito delle attività conoscitive regionali afferenti al "Sistema Informativo della Costa" si è deciso di investire fin dal 2004 nell'esecuzione di un rilievo altimetrico della fascia costiera con tecnologia laser-scanning (LiDAR) da piattaforma aerea (Ciavola *et al.*, 2006) (Figura 13). Successivamente, anche grazie al grande impulso e sviluppo di tale tecnologia e alla riduzione dei costi, nuovi rilievi sono stati condotti anche da parte altri enti (Eni nel 2006, Ministero dell'ambiente nel 2008, RER-Agenzia di protezione Civile nel 2010, Eni nel 2012 e Autorità di Distretto del Po nel 2019) che hanno

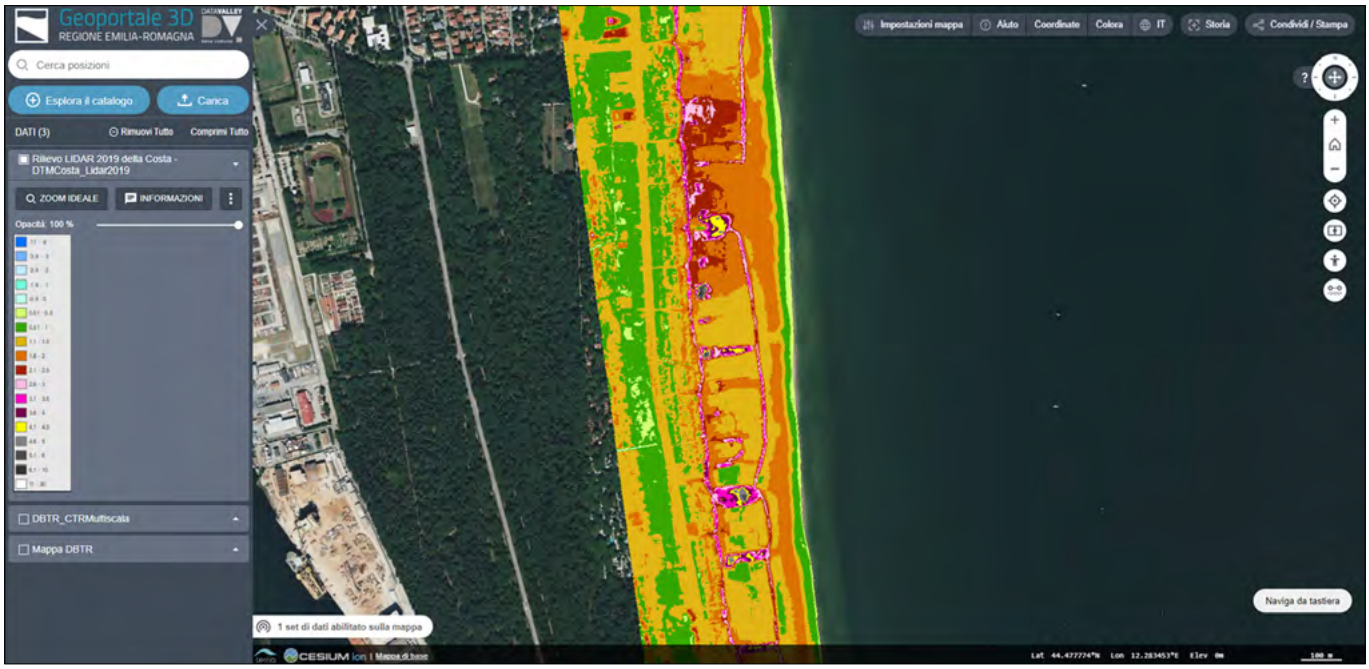


Figura 13. Dettaglio del risultato ottenuto dal rilievo Lidar 2019 - DTM e pubblicato nel portale regionale Geoportale 3D.

contribuito ad arricchire il dataset regionale consentendo lo sviluppo delle cartografie di pericolosità all'inondazione marina ai sensi del D.lgs. 49/2010 (Perini *et al.*, 2012) e di numerosi altri studi sulle morfologie costiere, come la nuova cartografia delle dune che sarà a breve pubblicata.

6.2 Studi sulla dinamica di lungo periodo e sulla geologia dell'interfaccia terra-mare

Per comprendere appieno i fenomeni di erosione costiera che interessano i litorali regionali e governare le scelte pianificatorie e di intervento è necessario approfondire gli studi dell'evoluzione millenaria della piana costiera, al fine di mettere in evidenza la natura profonda e l'origine dei fenomeni, la durata e la persistenza di situazioni critiche.

Per questo, nell'ambito del Sistema Informativo del Mare e della Costa, sono state sviluppate due attività principali: la dinamica della linea di costa e dei fondali nel medio/lungo periodo e lo studio della geologia dell'interfaccia terra-mare.

La dinamica della linea di riva a scala regionale e alla scala temporale delle centinaia di anni è dominata da un processo di rettificazione, che si manifesta attraverso l'erosione delle cuspidi deltizie e la crescita dei settori interposti. La causa che sta alla base di questo fenomeno è da ricercare nella modificazione del regime dei fiumi e dalla quantità e natura dei materiali da essi trasportati, avvenuta a seguito del cambiamento climatico col passaggio dalla Piccola Età Glaciale (PEG, circa dalla seconda metà del XIV alla metà del XIX secolo) al riscaldamento globale attuale: si è passati

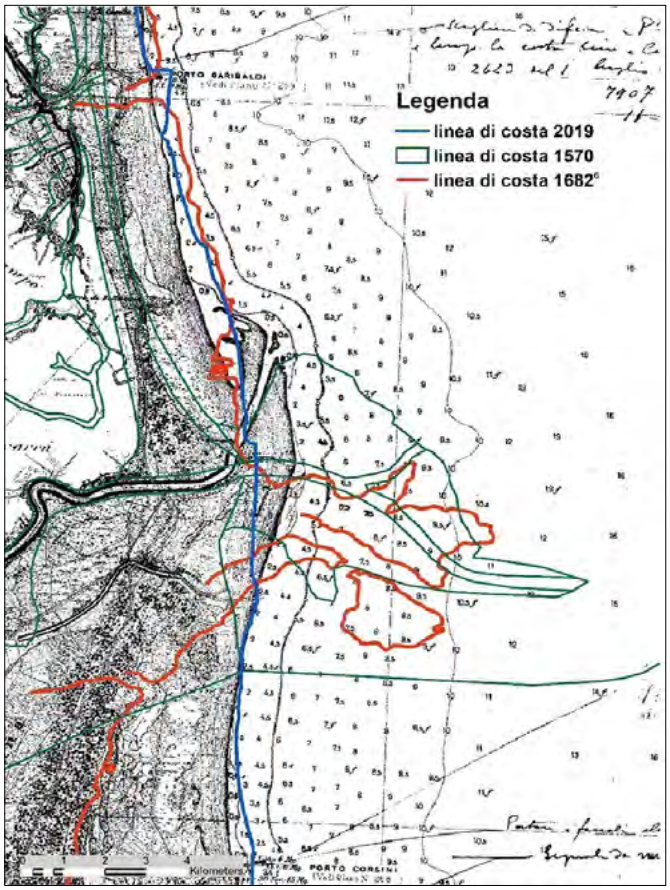


Figura 14. Primo impianto della carta topografica IGM del 1860 e carta nautica IIM 1901 con sovrapposte linee di riva antecedenti (1570 e 1682) e successive (2019).

da un surplus sedimentario e dalla crescita delle foci a un deficit di apporto e ad una sofferenza delle foci stesse. Spesso la tendenza alla rettificazione viene "mascherata" dalle dinamiche complesse della linea di riva a scala locale e a scale temporali minori (anni, decine di anni), fondamentalmente governate dagli interventi antropici sulla costa. Tra essi, a titolo di esempio, si ricordano la momentanea stabilizzazione della linea di riva grazie a opere di difese rigide o morbide e la formazione di hotspot erosionali ai margini dei sistemi di scogliere e migranti contestualmente all'ampliamento delle difese stesse.

La Figura 14 riporta il primo impianto della carta topografica IGM del 1860 e carta nautica IIM 1901 a cui sono state sovrapposte le linee di riva antecedenti (1570 e 1682) e successive (2019). La collocazione delle linee di riva di fine del '500 (linea verde, tratta da carta storica del Pasi del 1570) e la successiva di fine '600 (linea rossa, tratta da carta storica 'Romagna-Flaminia" del 1682) testimonia un apparato deltizio in avanzamento e aggettante rispetto alla costa (linea di riva a circa 8 e 6 km verso mare rispetto all'attuale).

L'immagine mostra inoltre una nuova forma della foce, indicazione di progressivo declino dell'attività fluviale, esacerbatosi ulteriormente nei tempi recenti, e un forte controllo da parte della corrente lungo costa.

Insieme al processo di rettificazione della linea di riva, sul lungo periodo, agisce anche un generalizzato approfondimento dei fondali evidenziato dal confronto tra i rilievi batimetrici di inizio XX secolo e quelli effettuati successivamente. Si ipotizza che alla base di questo fenomeno ci sia ancora una volta la crisi del trasporto solido susseguente alla PEG. La riduzione degli apporti ha modificato gli equilibri morfo-sedimentari del fondale marino, ancora soggetto ad un abbassamento dovuto alla subsidenza naturale (alla quale nel tempo si è sommata localmente quella antropica); con questa nuova configurazione delle forzanti e i nuovi profili di equilibrio il fenomeno più rilevante è l'aumento della pendenza del fondale vicino a riva e la conseguente riduzione dell'ampiezza della spiaggia sommersa che svolge una funzione di dissipazione per il moto ondoso. Anche in questo caso al fenomeno si sovrappongono dinamiche più recenti e locali come gli accumuli di sedimenti e il sollevamento del fondale in prossimità delle opere di difesa (ad esempio nel lato sopraflusso dei moli o a tergo delle scogliere).

Le dinamiche sopra brevemente introdotte si inquadrano nella storia geologica della fascia costiera regionale. L'evoluzione recente è caratterizzata dall'attività delle foci fluviali padane e appenniniche, dalla loro crescita, dall'abbandono, dalla ripresa, dalla modificazione del regime e dalle regimazioni antropiche.

Nella costa ferrarese si osservano tre edifici deltizi distinti, rappresentati dai lobi romani a sud (Po di Spina), quelli medievali e rinascimentali nel settore centrale (Po di Volano) e quelli del delta moderno a nord (Figura 15). La costa ravennate è caratterizzata dai lobi dei fiumi appenninici, meno sviluppati rispetto agli apparati della piana costiera ferrarese e che conobbero una relativa crescita durante la PEG. Il litorale più a sud è costituito da una sottile piana costiera dove non si osservano apparati del-

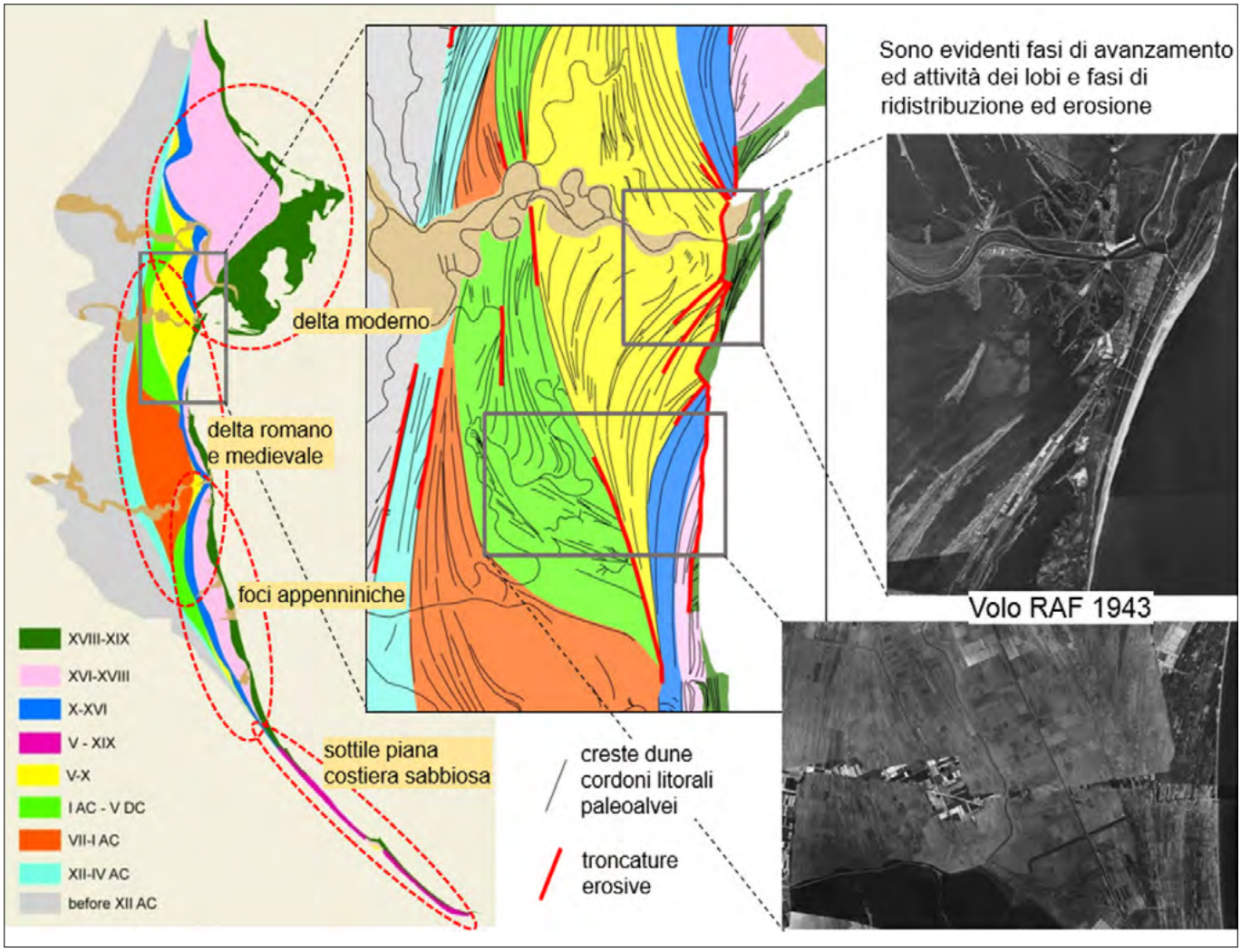


Figura 15. Evidenze geomorfologiche dei diversi lobi deltizi nella piana costiera ferrarese, con focus sul delta del Po di Volano. In giallo e in blu i lobi medievali e rinascimentali; in arancione e verde si osserva più a sud il delta sviluppatosi durante l'epoca romana.

tizi ben formati. I depositi deltizi e litorali affioranti sulla terraferma continuano anche nella porzione sommersa, al di sotto del fondale marino, testimoniando le complesse fasi sedimentarie e soprattutto caratterizzando in modo diverso i tratti costieri regionali. Ad esempio, la spiaggia attiva nel tratto costiero presso Lido delle Nazioni poggia sui depositi antecedenti al XVI secolo e presenti in prossimità della linea di costa a causa della profonda erosione e troncatura del delta del Po di Volano. È questo il motivo per cui in questo tratto costiero sulla spiaggia affiorano sovente depositi argilloso-limosi di retro-cordone.

7. LA STRATEGIA GIDAC

7.1 Riferimenti programmatici e normativi

Per far fronte agli impatti del cambiamento climatico e ridurre la vulnerabilità ed esposizione a rischio del territorio costiero ai fenomeni meteomarini, la Regione ha previsto un aggiornamento generale della sua strategia di gestione della costa che, a partire dalle Linee guida GIZC del 2005, tenesse conto delle nuove condizioni e degli scenari climatici attesi nei prossimi decenni.

Nel quadro programmatico regionale, la Strategia di Gestione Integrata per la Difesa e l'Adattamento della Costa ai cambiamenti climatici (GIDAC), già individuata dalla "Strategia unitaria di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici della Regione Emilia-Romagna" (D.A.L. 187/2018), è fra gli obiettivi introdotti dal DEFR 2020 - Documento di programmazione economica e finanziaria regionale come riferimento programmatico, del mandato dell'attuale giunta regionale e del DSR 2021-2027 (Documento Strategico Regionale per la programmazione unitaria delle politiche europee di sviluppo 21-27) che indica per l'*Asse della Costa la necessità di uno strumento di programmazione unitario in grado di aggiornare il Piano costa e la difesa del litorale con l'obiettivo di integrare la manutenzione ordinaria e gli interventi strutturali complessi e di area vasta*, e contribuisce inoltre a 4 dei 17 obiettivi dell'Agenda 2030 della Regione Emilia-Romagna.

I riferimenti normativi e gli strumenti vigenti riguardano, oltre a quanto già citato per il SIC (Cfr. 6), la L.R. 7/1979 per la difesa della costa regionale, l'art. 29 della L.R. 17/2004 che introduce la gestione integrata della zona costiera e la successiva D.C.R. 645/2005 che approva le Linee Guida GIZC regionali, la D.A.L. 187/2018 e la D.G.R. 1588/2019, recepimento delle *"Linee Guida nazionali per la difesa delle coste dai fenomeni di erosione e dagli effetti dei cambiamenti climatici"* predisposte dal Tavolo Nazionale sull'Erosione Costiera (TNEC), e inoltre la L.R. 15/2018 sulla Partecipazione all'elaborazione delle politiche pubbliche.

7.2. Sviluppo e obiettivi della Strategia

La Strategia GIDAC è stata sviluppata attraverso un articolato processo partecipativo nel periodo 2021-2022 (CheCostaSarà?), grazie al progetto europeo AdriaClim (Programma Interreg Italia-Croazia Strategico 2020-2023) con il coinvolgimento di vari soggetti portatori d'interesse, pubblici e privati, del territorio costiero e non solo. Inoltre, nella logica di operare non soltanto "per" ma soprattutto "con" le nuove generazioni, si è realizzato un percorso dedicato "Innovation Camp – Patto intergenerazionale per la difesa e l'adattamento della costa ai cambiamenti climatici" (marzo-aprile 2023) finanziato dal programma Science Meets Regions del Centro Comune di Ricerca (JRC) della Commissione Europea.

Gli obiettivi della GIDAC emersi e messi a punto nell'ambito di tale percorso fanno riferimento alle necessità di riduzione della vulnerabilità del territorio costiero, di gestione sostenibile delle risorse naturali, di rigenerazione del sistema fisico e delle aree urbane in chiave adattiva e di aumento della resilienza della fascia costiera.

In particolare, sono stati individuati sei obiettivi generali.

1. Ridurre la vulnerabilità del territorio costiero garantendo un adeguato assetto di sicurezza del sistema spiaggia in relazione alla sua funzione di prima "struttura di difesa " per la protezione dell'entroterra.
2. Garantire la conservazione e l'integrità degli ecosistemi costieri, dei paesaggi e della geomorfologia per le generazioni presenti e future.
3. Promuovere lo sviluppo sostenibile della zona costiera, con riguardo ad una pianificazione razionale delle attività umane in relazione agli scenari attesi dei cambiamenti climatici.
4. Prevenire/mitigare gli effetti del cambiamento climatico sul territorio costiero relativi all'innalzamento del livello del mare, all'erosione, alle mareggiate e ai fenomeni di ingressione marina
5. Garantire l'uso e la gestione sostenibile e coordinata delle diverse risorse di sedimenti utili per il ripascimento e il mantenimento delle spiagge.
6. Garantire la coerenza tra le iniziative pubbliche e private che riguardano gli interventi di trasformazione, la protezione e l'adattamento della zona costiera, la gestione dei litorali, l'uso sostenibile e la conservazione delle risorse di sedimenti e del territorio costiero.

Tali obiettivi generali fanno riferimento ai quattro pilastri della Strategia come di seguito indicati.

- Liberare spazi lungo la costa e mantenere le spiagge libere da strutture e infrastrutture creando fasce di rispetto per l'esplicarsi delle dinamiche marine, favorendo la riorganizzazione dei tratti costieri critici e, ove necessario, l'arretramento o il riallineamento degli elementi antropici.
- Garantire un adeguato apporto di sedimenti al sistema costiero, provenienti da diverse fonti interne ed esterne, al fine di ripristinare e mantenere l'equilibrio sedimentario per le condizioni climatiche attuali e attese.
- Promuovere l'integrazione dei costi dei rischi costieri nei processi decisionali in materia di pianificazione e investimenti sulla costa, attraverso un approccio integrato di valutazione costi/benefici.
- Mantenere un sistema delle conoscenze sempre aggiornato sulle dinamiche costiere e fluviali, sulla gestione delle fonti di sedimenti, sull'erosione e sui fenomeni e rischi costieri in relazione agli scenari climatici presenti e attesi, sulla pianificazione urbanistica e territoriale, sugli interventi e trasformazioni del territorio in fascia costiera.

La Strategia individua quindi una serie di azioni per la sua attuazione, raggruppate in quattro aree tematiche:

- **Azioni di Sistema** (gestione delle fonti di sedimento, riduzione della subsidenza antropica e ripristino del trasporto solido fluviale)
- **Azioni di Adattamento** (trasformazioni del tessuto urbanizzato, riduzione della vulnerabilità, adattamento del sistema spiaggia e potenziamento del sistema di allertamento costiero);
- **Azioni di Manutenzione** (su spiagge, opere di difesa e opere portuali);
- **Azioni Trasversali** (collaborazione tra soggetti competenti e portatori d'interesse, aggiornamento delle conoscenze, valutazione dei costi connessi ai rischi e agli impatti nelle decisioni sugli interventi costieri).

7.3. Quadro conoscitivo e individuazione dei tratti critici

Uno dei principali obiettivi del quadro conoscitivo della GIDAC è l'individuazione dei tratti critici del litorale per i quali prevedere interventi di difesa più efficaci, volti

FIGURA 16. Tratti critici della costa regionale (Regione Emilia-Romagna, 2022).

a ridurre la vulnerabilità rispetto ad erosione e ingressione marina. L'individuazione dei tratti critici (Fig.16) è stata effettuata sulla base di due indicatori costieri, SI_TOT (Perini *et al*., 2019) e ASPE (Arpae, 2020) che sintetizzano le informazioni dei parametri fisici monitorati e delle osservazioni dirette in relazione agli scenari di pericolosità attuale e futura (mappe della pericolosità di inondazione marina al 2019 e al 2100 (Perini *et al*., 2017)).

L'insieme formato dalle reti di monitoraggio sistematico (Cfr. 3) con le altre acquisizioni e approfondimenti tematici e gli indicatori che ne derivano (Cfr. 4), inquadrato nel sistema gestionale delle celle litoranee SICELL (Cfr. 5) e gestito con il sistema di raccolta dei dati del SIC (Cfr. 6) e dei diversi geoportali per la condivisione delle informazioni, rappresenta il necessario sistema della conoscenza della costa per la comprensione dei fenomeni e per la gestione dei litorali e dei rischi costieri.

7.4. ATTUAZIONE E MONITORAGGIO DELLA STRATEGIA

L'attuazione della Strategia GIDAC è prevista attraverso la programmazione regionale, con finanziamenti per azioni e interventi da fondi regionali e nazionali, e con il recepimento negli strumenti di pianificazione locale e di area vasta degli indirizzi per la riduzione della vulnerabilità ed esposizione a rischio.

Un sistema di monitoraggio, in fase ora di impostazione secondo le indicazioni del documento di Strategia, con un set di indicatori di cui una parte dialoganti con quelli proposti dal Piano Nazionale per l'Adattamento ai Cambiamenti Climatici recentemente pubblicato (PNACC, Dicembre 2022), permetterà da un lato di seguire lo stato di avanzamento dell'attuazione della GIDAC e dall'altro di valutare l'efficacia delle azioni e degli interventi proposti ed eventualmente riformulare in chiave migliorativa.

CONCLUSIONI

La valutazione quantitativa delle componenti di un ambiente così dinamico come quello costiero in un'ottica il più possibile integrata è un obiettivo di non facile raggiungimento, a causa sia della intrinseca complessità del sistema dove ogni componente è governata da meccanismi diversi e ognuna di queste interagisce con le altre, alle diverse scale spaziali e temporali, e sia dell'intermittenza con la quale molto spesso gli studi vengono realizzati.

La Regione Emilia-Romagna, fin dal 1981 con il primo "Piano progettuale per la difesa della costa adriatica Emiliano-Romagnola", ha dato il via alla sistematizzazione degli studi connessi al problema dell'erosione costiera tramite il monitoraggio delle componenti fisiche. Oggi, a distanza di diversi decenni, sono disponibili le reti di monitoraggio sistematico (Cfr. 3), inquadrate nel sistema gestionale delle celle litoranee SICELL (Cfr. 5) insieme a tutti gli altri approfondimenti tematici e agli indicatori che ne derivano (Cfr. 4), raccolti attraverso il sistema del SIC (Cfr. 6) e dei diversi geoportali, tra cui quello di Arpae.

Questo articolato insieme di informazioni e strumenti, che nella strategia GIDAC (Cfr. 7) prende il nome di "sistema delle conoscenze della costa", diventa oggi più che mai essenziale per la comprensione dei fenomeni, la valutazione dei rischi e quindi la gestione dei litorali.

Una gestione che, grazie a questo supporto, possa essere auspicabilmente sempre più pianificata sul medio-lungo periodo e sempre meno emergenziale, in un'ottica di prevenzione dei danni, e che sia quanto più possibile diversificata in relazione alle specificità dei paraggi costieri e alle diverse esigenze di messa in sicurezza delle strutture e infrastrutture e conservazione degli elementi naturali ancora presenti.

Inoltre, il repentino sviluppo tecnologico dei sistemi di rilevamento pone senza dubbio la necessità di un continuo aggiornamento e implementazione delle reti e di formazione costante del personale tecnico e, parallelamente, di miglioramento dei sistemi di diffusione e condivisione dell'informazione tra i portatori d'interesse pubblici e privati.

BIBLIOGRAFIA

Aguzzi, M., De Nigris N., Preti M., Mallegni R. (2012). *Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola*. Studi Costieri N. 20, pp. 95-109. http://www.gnrac.it/rivista/Numero20/Articolo8.pdf

Arpa (2008). *Stato del litorale emiliano romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione*. I Quaderni di Arpa.

Arpae (2016). *Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012. Erosione e interventi di difesa*. I quaderni di Arpae. Pagine 227. ISBN978-88-87854-41-1. https://www.arpae.it/it/eventi/2016/2016_stato_litorale_volume.pdf

Arpae (2018). Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Seconda fase. Relazione finale. https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/suolo/rapporti/rapporti-subsidenza/rilievo-della-subsidenza-nella-pianura-er-seconda-fase-1.pdf

Arpae (2020). *Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2018 erosione e interventi di difesa.* https://www.arpae.it/it/documenti/pubblicazioni/slem-arpae-2020-web-leggera.pdf

Bondesan M., Calderoni G., Dal Cin R. (1978). *Il litorale delle province di Ferrara e di Ravenna (Alto Adriatico): evoluzione morfologica e distribuzione dei sedimenti.* Boll. Soc. Geol. It., 97, pp. 247-287.

Bondesan M., Favero V., Viñals M. J., (1995). *New evidence on the evolution of the Po delta coastal plain during the Holocene*. Quaternary International Vol. 29/30, 105-110.

Ciavola, P., Perini, L., Luciani, P., Armaroli, C. (2006). *Application of terrestrial LIDAR surveys for the evaluation of dune erosion generated by storm events*. Atti di: 5th European congress on regional geoscientific cartography and information systems, Barcellona: Institut Cartogràfic de Catalunya, Spagna, vol. 1, pp. 540-542.

Ciavola P., Armaroli C., Chiggiato J., Valentini A., Deserti M. Perini L., Luciani P. (2007). *Impact of storms along the coastline of Emilia-Romagna:*

the morphological signature on the Ravenna coastline (Italy). (1.83 MB) Journal of Coastal Research, SI 50, pp. 540-544.

Ciavola P and J. A. Jimenez (2013). *The record of marine storminess along European coastlines*. Natural Hazards Earth System Sciences, 13, 1999–2002, 2013. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/1999/2013/ doi:10.5194/nhess-13-1999-2013

Ciavola, P., Ferreira, O., Haerens, P., Van Koningsveld, M., Armaroli, C., Lequeux, Q. (2011). *Storm impacts along European coastlines. Part 1: The joint effort of the MICORE and ConHaz Projects*, Environmental Science Policy, 14, 912–923, 2011.

Dal Cin R., Calderoni G., Simeoni U. (1979). *Caratteri sedimentologici del litorale romagnolo - Le spiagge di Romagna: uno spazio da proteggere*. C.N.R. Quaderno n° 2, Bologna, 31-36.

Fox-Kemper B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, (2021). *Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362, doi: 10.1017/9781009157896.011. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-9/

GNRAC (2006). *Le spiagge dell'Emilia-Romagna. Studi costieri - 2006 - 10: Lo stato dei litorali italiani*.

Perini L., Calabrese L., Deserti M., Valentini A., Ciavola P., Armaroli C. (2011). *Le mareggiate e gli impatti sulla costa in ER 1946/2010*. I quaderni di Arpa. Arpa Emilia-Romagna. ISBN 88-87854-27-5

Perini L., Calabrese L., Deserti M., Valentini A., Ciavola P., Armaroli C. (a cura di) (2011). *Le Mareggiate e gli impatti sulla costa in Emilia-Romagna, 1946-2010*. I quaderni di Arpa, pp. 141. Arpa Emilia Romagna, Bologna, ISBN 88-87854-27-5.

Perini L., Calabrese L., Luciani P., Olivieri M., Galassi G., Spada G. (2017). *Sea-level rise along the Emilia-Romagna coast (Northern Italy) in 2100: scenarios and impacts*, Natural Hazards Earth System Sciences, 17, 2271-2287, https://doi.org/10.5194/nhess-17-2271-2017

Perini L., Calabrese L., Salerno G., Luciani P. (2012). *Sea flood hazard mapping in Emilia-Romagna*, In: 7th EureGeo Conference - EUropean Congress on REgional GEOscientific Cartography and Information Systems. vol. 1, p. 334-335, Regione Emilia-Romagna, Bologna, 12-15 giugno 2012 – Abstract.

Regione Emilia-Romagna (1984). *Piano progettuale per la difesa della costa adriatica Emiliano-Romagnola – volume VI. Le opere a mare: caratteristiche ed effetti sul litorale*.

Regione Emilia-Romagna (1996). *Progetto di piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna. Relazione Generale*.

Regione Emilia-Romagna (2011). *Nuovi strumenti di gestione dei litorali in Emilia-Romagna*. SICELL. *Il sistema gestionale delle celle litoranee*. Montanari R. e Marasmi C. (a cura di).

Regione Emilia-Romagna (2014). *SICELL. Il sistema gestionale delle celle litoranee. Aggiornamento 2006-2012*. Montanari R. e Marasmi C. (a cura di). https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/suolo-bacino/argomenti/progetti-interventi/difesa-della-costa/sicell

Regione Emilia-Romagna (2022). *Strategia di gestione integrata per la difesa e l'adattamento della costa ai cambiamenti climatici (GIDAC)*. https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/suolo-bacino/argomenti/difesa-della-costa/gidac/gidac-dicembre-2022

Teatini P., Ferronato M., Gambolati G., Bertoni W., Gonella M. (2005). *A century of land subsidence in Ravenna, Italy*. Environ. Geol, 47, 831>846.

Valentini A. (2016). *Review of Climate change impacts on sea storm occurrence*. Report progetto Life Primes. Azione A1.

WMO (2022). *Provisional State of the Global Climate 2022*. https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate

SITOGRAFIA

Dext3r: https://simc.arpae.it/dext3r/

Portale Cartografico di Arpae: https://www.arpae.it/it/dati-e-report/dati-ambientali/il-portale-cartografico-di-arpae

Dati Ambientali Emilia-Romagna - Rischi costieri 2019: https://webbook.arpae.it/erosione-costiera/

Portale minERva, Direzione Generale Cura del Territorio ed Ambiente della Regione Emilia-Romagna: https://datacatalog.regione.emilia-romagna.it/catalogCTA/

Accesso webgis Area Geologia, Suoli e Sismica del Settore Difesa del Territorio: https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banchedati

Gidac AA.VV., 2022 - Quadro conoscitivo della Strategia: https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/costa/il-quadro-conoscitivo-della-strategia-gidac

Geoportale 3D: https://mappe.regione.emilia-romagna.it/

Geoportale Adriatico-Ionio (GAIR): https://maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/practices/geo-data-portal-adriatic-ionian-region-gair

Le problematiche della rada di Alghero, paradigma dell'assetto costiero in Sardegna

The problems of the Alghero bay, paradigm of coastal planning in Sardinia

Giovanni Tilocca
Geologo libero professionista

E-mail: tilokka@yahoo.it

Parole chiave: Unità fisiografica, opere marittime, Posidonia Oceanica
Key words: Physiographic unit, maritime works, Posidonia Oceanica

RIASSUNTO

Le spiagge principali della Rada di Alghero, nel loro complesso sono spiagge ricreazionali abbondantemente artificializzate e versano in uno stato geomorfologico patologico di particolare dissesto, derivante dalla stratificazione di opere marittime che non hanno mai tenuto in sufficiente considerazione le conseguenze sia di breve che di medio e lungo periodo e che conseguono anche ad una massiccia dose di incoerenza. A questo si aggiungano gli effetti della incongrua gestione dei depositi stagionali di Posidonia oceanica. Esse, quindi, scontano da diversi decenni un rilevante quanto variegato stato di strutturale dissesto deformativo conseguente alla sovrapposizione nel tempo (ultimi 30 anni circa) e nello spazio, di opere marittime (e di interventi sul litorale), le une disgiunte dalle altre, i cui esiti morfodinamici, "sommandosi" fra loro nello spazio, hanno recato processi indesiderati, sia di breve che di lungo periodo, in diverse porzioni dell'intero tratto.

PREMESSA

Alghero (SS) è uno dei principali centri del turismo balneare in Sardegna ed il primo ad essere divenuto, nel 1954, destinatario di turismo internazionale anche in conseguenza della sua Rada, la quale costituisce una consistente attrattiva turistica per evidenti ragioni ambientali e paesaggistiche, pressoche totalmente legate o influenzate dalle matrici geolitologiche e dall'assetto geomorfologico. La Rada è delimitata a Nord da morfostrutture calcaree e calcareo dolomitiche di età compresa fra il Triassico e il Cretaceo; a Sud e SudEst da un vasto sistemi di eolianiti fossili pleistoceniche che poggiano su terreni vulcanici miocenici di genesi prevalentemente effusiva piroclastica, affioranti anche nell'isolotto di *La Maddalenetta* e nei suoi bassifondi al centro della rada. L'impianto della città storica anch'esso in arenarie dunali fossili poggia su di un sostrato dolomitico triassico urbano sormontato da ignimbriti nel settore portuale.

GENERALITÀ

Per *Rada di Alghero*, si considera in questa sede lo specchio acqueo ricompreso fra Capo Galera ad Ovest e il promontorio su cui è stata edificata la città medioevale di Alghero a Est. La casistica delle problematiche costiere riscontrabili al suo interno (tutto il suo periplo ricade nel comune di Alghero) è così ampia da offrire in pratica l'intera gamma delle difficoltà storiche e delle lacune sussistenti nella gestione di quella che è considerata da molti la principale risorsa della Sardegna, sia in chiave ambientale che economica, ossia la sua costa.

La spiaggia sottesa alla rada di Alghero, dalla radice del molo di sottoflutto del porto di Fertilia alla Radice del molo di sottoflutto del Porto di Alghero, costituisce un'Unità Fisiografica ben delineata. Essa, per ragioni attinenti agli assetti morfodinamici attuali, conseguenti come detto alle massicce trasformazioni recate dalle opere marittime, è stata suddivisa nelle 3 parti di cui sopra, SUG1, SUG2 e SUG3. In SUG1 sono stati definiti ulteriori tre sotto-tratti, in ragione di quel che è emerso dalle osservazioni morfologiche di dettaglio sul posto, dall'analisi delle serie storiche di foto aeree e dalle comparazioni multi temporali di queste (o di cartografie ufficiali). Poiché i riscontri morfologici debbono sempre potersi considerare il risultato degli equilibri dinamici che si strutturano fra spiaggia emersa e spiaggia sommersa, secondo rapporti di interazione trasversali e longitudinali,, è di estrema importanza saper tenere conto sia delle modificazioni di breve che di lungo periodo. In primo luogo, tuttavia, deve essere tenuto ben presente che è nel trasporto dei sedimenti *long-shore* (longitudinale) che va individuata la maggiore causa di modificazione strutturale (deformazione) ossia di lungo periodo della linea di costa. Sappiamo che se tale trasporto, sempre generato da moto ondoso obliquo rispetto al litorale, è in grado di assicurare budget positivi di sedimento, le spiagge si sviluppano soprattutto progradando verso mare e/o aggradando (cioè irrobustendosi verso l'alto); se invece il budget è negativo, esse si erodono assieme alle dune, la cui asportazione da parte del mare in tempesta ha la funzione di compensare il flusso negativo di sedimenti e dunque determinare un nuovo equilibrio. A queste regole basilari non sfugge neppure il caso di Alghero. E nonostante Mancinelli et al. (2005) sostengano (in base all'orientazione a 230° della corda che unisce la radici del molo di sottoflutto del Porto di Alghero alla radice del molo di sopraflutto di Fertilia) che il regime di trasporto dei sedimenti della spiaggia da parte del moto ondoso sia prevalentemente trasversale, le osservazioni di lungo periodo evidenziano una complessità assai maggio-

re della dinamica che contraddice l'assunto precedente. Nelle varie SUG appare infatti peculiare il ruolo di quello che un tempo veniva suggestivamente definito Nastro Trasportatore Litoraneo[1] (NTL), qui complicato dalla presenza di un elemento diffrattivo naturale (isolotto di La Maddalenetta) con bassifondi allungati trasversalmente al Maestrale e longitudinalmente al Libeccio (i due venti dominanti in ordine decrescente), che sono espressione di una più generale batimetria a controllo geologico e infine da molteplici opere marittime.

All'interno della Rada di Alghero sono infatti presenti in sintesi:

- n. 3 sistemi di spiagge principali: San Giovanni (o Lido di San Giovanni), Maria Pia e Fertilia;
- n. 3 spiagge minori incassate: Il Lazzaretto, Le Bombarde e Punta Negra, di cui una (Punta Negra) sostanzialmente artificiale o particolarmente artificializzata;
- n. 2 Litorali Urbani (ai sensi della Deliberazione Giunt Regionale n.14/36 del 23.3.2016 (Fig.1).
- n. 2 Porti turistici di competenza regionale, quello di Alghero e quello di Fertilia ricavato su una bocca di laguna artificializzata. Ne conseguono n.4 moli aggettanti e relative protezioni in massi, di due porti turistici : ad Alghero, prolungamenti ed estensioni ultimate fra 1990 e 1992; a Fertilia completamento fra 1989 e 1998);
- n. 1 opera di difesa costiera a parziale ristoro degli effetti del braccio portuale principale, ricavata con n. 9 barriere in blocchi di cava (Larghezza =3,5m al coronamento; h=0,70m; 1981-1983) disposte parallele a quinconce a circa 150m dalla riva fra i 3,00m e i 4,5m di profondità (opera non completata all'estremità Nord);
- n. 1 barriera aderente in calcestruzzo sul lato Nord di Punta del Paru (a protezione dell'Ospedale marino; fine anni '60);
- n. 1 barriera in massi di cava e pietrame aderente alla precedente sul lato mare (1993);
- n. 1 barriera aderente in massi di cava, a protezione del campeggio Mariposa sul lato Sud di Punta del Paru (2001);
- un isolotto foraneo con faro circondato da bassifondi rocciosi.
- una bocca di laguna coincidente con la darsena del Porto Turistico di Fertilia;
- la foce di un canale tombato di scolo nella porzione più meridionale della spiaggia (San Giovanni);
- una vasta e robusta prateria di *Posidonia oceanica* (di seguito P.o.)

A ciò si aggiungano i seguenti elementi:

- decine di concessioni demaniali marittime sulle spiagge;
- un'ampia zona sistematicamente non balneabile, per ragioni igienico-sanitarie, conseguente a contaminazioni da batteri fecali contenuti nei deflussi del suddetto canale;
- un sistema dunale stabilizzato con Pinus pinea dagli anni '30 già deprivato di volumi ingenti nel corso della realizzazione dell'Ospedale marino nel settore di Punta del Paru, massimamente degradato o scomparso in direzione Sud per l'edificazione, la realizzazione di viabilità urbana.
-

Il Porto Turistico di Alghero dispone di non meno di 2000 posti barca ed è il più capiente fra i porti turistici della Sardegna. Lo sviluppo del progetto portuale di Alghero era stato pensato per fare spazio alle navi da crociera ma poiché il pescaggio dello specchio acqueo non è mai stato reso funzionale alla stazza e al dislocamento delle navi da crociera, a causa della resistenza del basamento roccioso del porto (*Secca del Traitor*) queste sono sempre rimaste al più alla fonda nella Rada o hanno previsto altre destinazioni.

Nell'area retrostante la spiaggia, inoltre, soltanto negli ultimi 30 anni hanno determinato interferenze con l'assetto delle spiagge, la dismissione e la rimozione della linea ferroviaria a scartamento ridotto e i lavori di riqualificazione del Lungomare che hanno palesemente interessato una parte dell'arenile di neo formazione nel sotto-tratto A di SUG1 (tratto A della Fig. 8).[2]

Si noti infine che, a proposito di NTL, che nella bocca portuale di Fertilia nel 2000 sono stati eseguiti lavori di dragaggio delle sabbie con lo scopo di ridurre la profondità della bocca stessa. Tali sabbie nulla avevano a che fare con i più classici fanghi portuali, trattandosi in larga misura di sedimenti quarzoso-feldspatici e bioclastici bianchissimi (se asciutti) provenienti dal settore di spiaggia sommerso limitrofo per effetto della morfodinamica longitudinale diretta SudEst-NordOvest, la quale determina accumulo progradante trasversale in spiaggia sommersa (con effetti rilevanti sulla pro gradazione di quella emersa) alla radice del molo di sottoflutto del porto e progressivo ingresso di sabbie nello stesso. Si consideri che:

- le sabbie dragate furono in seguito smaltite in discarica;
- con delega al comune di Alghero per l'intervento, la RAS ha finanziato con 1000.000€ un nuovo dragaggio della bocca adducendo, del tutto incoerentemente con la conoscenza morfodinamica, che si tratti di sedimenti derivanti dalle foci dei torrenti che alimentano la laguna;
- il progetto che ne è derivato ha messo in evidenza (ex DM 173/2016) la presenza di 6000mc di sedimenti inquinati da benzene da conferire in apposita discarica e ben 20.000mc di sedimenti sabbiosi con resti di P.o. non inquinati (più precisamente "compatibili dal punto di vista ecotossicologico e chimico") che andranno soggetti a "*Immersione deliberata in aree marine non costiere*

1 W. Bascom (1964) – Onde e spiagge – Dinamica della superficie marina. pp 195. Zanichelli,Bologna. (titolo originale: *Waves and beaches*. Educ. Services Inc.. 1964).

2 Proprio dagli escavi che la spiaggia dovette subire per fare spazio alle nuove opere, provenivano le sabbie miste a materiali di risulta che fra Aprile e Maggio 2004 furono posizionate con intervento di "ripascimento" del tutto sperimentale e sui generis nel settore di SUG3 in arretramento dinanzi al Palacongressi. Di tale esperimento che, si disse, mirava al recupero delle sabbie altrimenti destinate in discarica, rimane traccia nei soli resti di demolizioni ancora reperibili nel tratto ripasciuto in ragione della dinamica long-shore tendente a spostare i sedimenti verso la trappola sedimentaria consolidatasi con lo sviluppo delle opere portuali Regionali di Fertilia.

(oltre le 3 mn)", in quanto giudicati "non compatibili da un punto di vista granulometrico/composizionale"con i sedimenti delle spiagge emerse e sommerse limitrofi[3] e quindi col loro ripascimento.

Si noti inoltre che il comune non è dotato di Piano di Utilizzazione dei Litorali.

L'UNITÀ FISIOGRAFICA PRINCIPALE

Il bilancio sedimentario della Unità Fisiografica principale è condizionato dall'assetto geo-morfologico che impedisce l'input torrentizio alla cella sedimentaria. Infatti, i sedimenti del Riu Calvia, del Riu Barca e del C.le Urune, affluenti laguna di Calich sono in questa trattenuti e non hanno al momento alcuna possibilità di essere conferiti in ambito marittimo cioè oltre bocca della Laguna, divenuta peraltro sede di un Porto Turistico realizzato dalla R.A.S.. Il ripascimento di sabbia naturale della rada, quindi, è nullo.

L'Unità Fisiografica principale, così come ricavabile dalle foto aere, è piuttosto confinata in ambito sommerso, poiché il limite superiore della prateria di P.o. è molto prossimo alla costa, spingendosi fino a -5m al di sotto del l.m.m.; cosa questa che appare piuttosto singolare rispetto alla stragrande maggioranza dei paraggi costieri esposti dell'isola (profondità di solito ricompresa fra -8m e -11m).

Altrettanto inusuale peraltro appare il cosiddetto "*canale*" sabbioso che si estende per circa 2,5Km fino ad una inusuale profondità di -25m a partire dalla spiaggia sommersa antistante la bocca della Laguna del Calich e che viene interpretato come la traccia di una valle torrentizia incisa nell'intervallo glaciale Wurmiano con livello del mare a -135 dal l.m.m attuale, con LGM a circa 20Ky.

Sulla base degli elementi morfo-batimetrici a disposizione e della morfodinamica modale, nonché della nomenclatura suggerita dalle Linee Guida TNEC, 2018, fra Alghero e Fertilia si sono distinte n. 3 Sub Unità Gestionali, SUG1, SUG2 e SUG3, secondo le indicazioni delle Figg.1 e 2.

Figura 1. Localizzazione delle spiagge e Definizione delle Unità fisiografiche della Rada finalizzate allo studio.

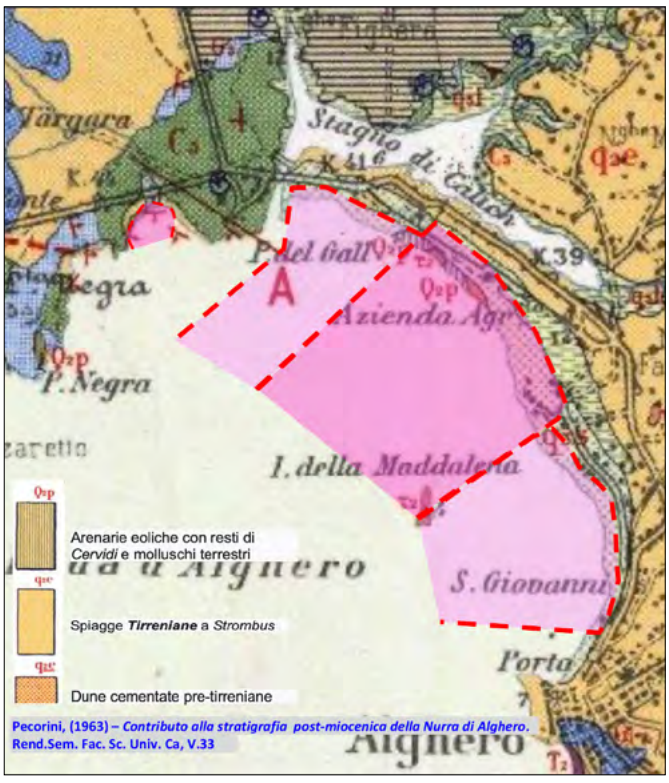


Figura 2. Stralcio del F° geologico 192-Alghero; vi sono riportate le suddivisioni delle SUG considerate.

3 In relazione alle prime due opzioni di gestione, appare necessario immediatamente sottolineare che i campioni analizzati, pur compatibili con tali gestioni da un punto di vista ecotossicologico e chimico, non lo sono da un punto di vista granulometrico/composizionale. Infatti i materiali di dragaggio sono composti, come evidenziato dalle analisi granulometriche e sedimentologiche, prevalentemente da materia organica (alghe costituite da foglie e rizomi di Posidonia oceanica), in genere di colore grigio o grigio scuro, con odore di idrogeno solforato, condizioni che li rendono, a nostro giudizio, assolutamente non compatibili con i sedimenti delle spiagge emerse e sommerse delle aree limitrofe!".

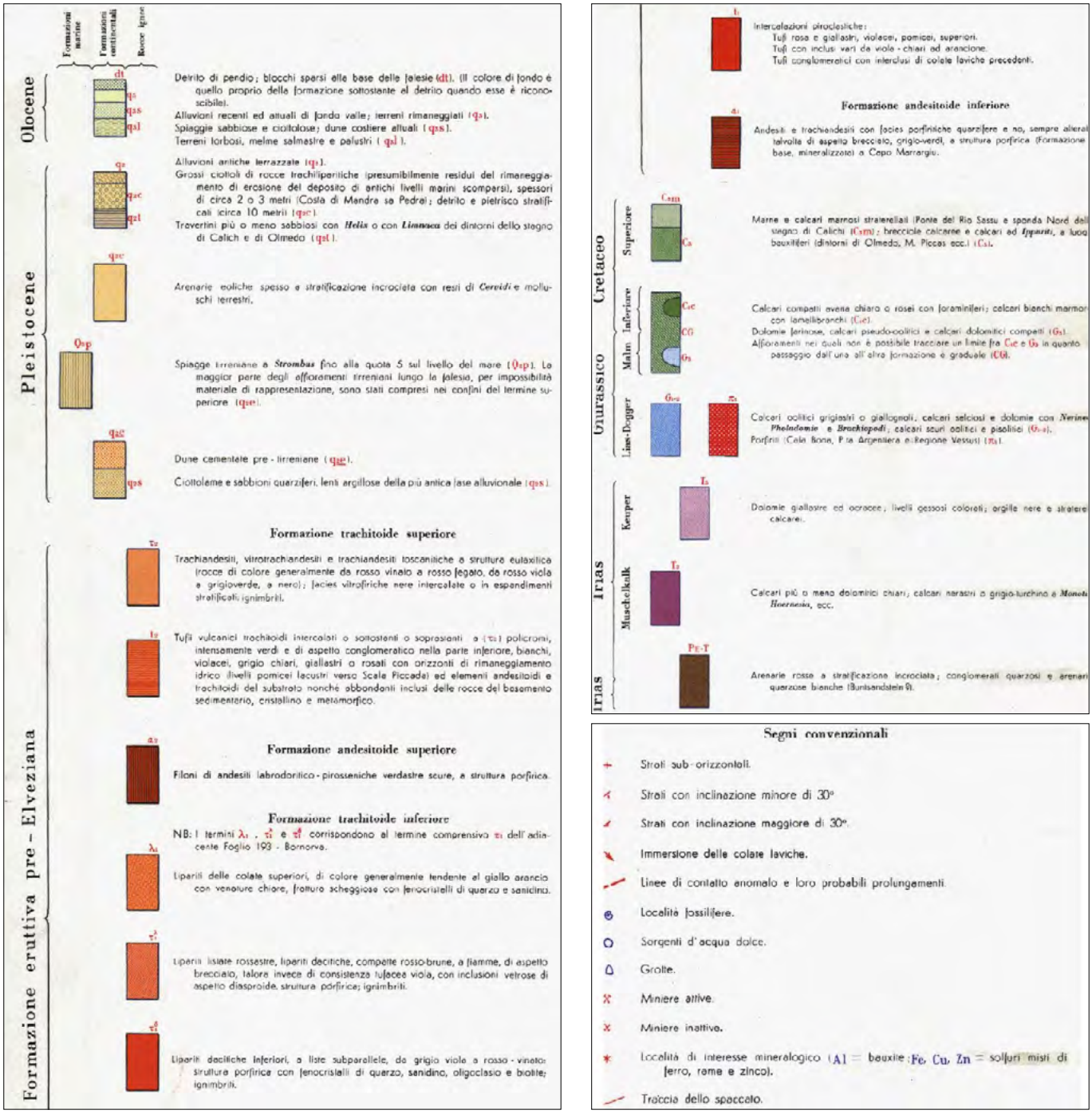


FIGURA 3. Legenda F° Geologico 192 "Alghero.

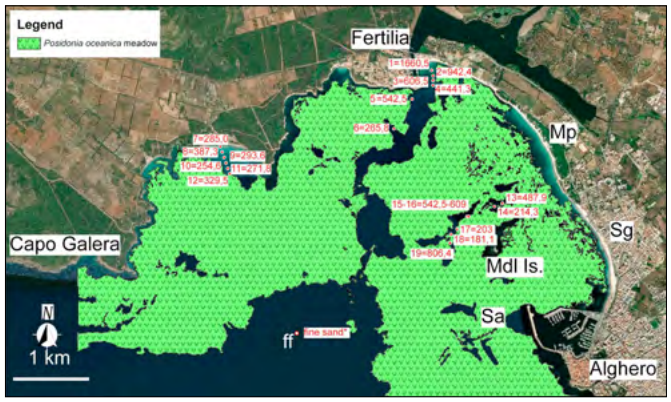


FIGURA 4. Prateria di Posidonia oceanica (Da De Luca et al. (2020) – Seafloor Map of the Alghero Bay (Sardinia, Italy). Journal of Maps, VOL. 16, n.2, 669–679. (Mdl Is.: La Maddalenetta; MP:Maria Pia; Sg: San Giovanni), La carta indica le granulometrie in μm di campioni di sabbia studiati dagli autori.

ANALISI DELLA SUG1

La spiaggia di riferimento è quella del Lido di San Giovanni. In linea generale, su di essa, dal punto di vista morfodinamico si possono distinguere da Sud verso Nord almeno tre sotto-tratti (Fig. 13) nei quali si osservano i seguenti processi risultanti di lungo periodo:

a) Il tratto più meridionale di SUG1 con corda[4] di 400m circa, dalla radice del molo di sottoflutto fino all'inizio della falcata sabbiosa, nell'assetto degli anni '50, '60 e '70 è rimasto praticamente privo di sedimenti sabbiosi con deposizioni stagionali di sedimenti vegetali a P.o.. Tale condizione, stabile nella configurazione portuale storica e fino a tutti gli anni '70 (1979), dalla metà degli

4 S'intende con questo termine la congiungente rettilinea delle due estremità

anni '80 è via via divenuto *Arenile* in s.s. con spiaggia progradante e aggradante a tutti gli effetti ed avanzamento della linea di riva ad oggi valutabile nell'ordine di 40m-60m. Tale fenomeno è stato dovuto all'azione d'intrappolamento sedimentario che si è determinata in conseguenza del pronunciamento trasversale del molo di sopraflutto fino a più di 1000m (1030m) dalla linea di costa (con un incremento di 400m dalla configurazione del 1979 e di ben 545m da quella del 1972) e dell'estensione a Nord dello specchio acqueo portuale, ottenuta con il nuovo molo di sottoflutto. La situazione morfologica della spiaggia fino al 1977 è visibile in foto aerea nelle Figg. 5, 6 e 7.

Tutte le immagini orto fotografiche successive al 1977 attestano di progressive trasformazioni. Questo sotto-tratto litorale è dunque divenuto di accumulo strutturale.

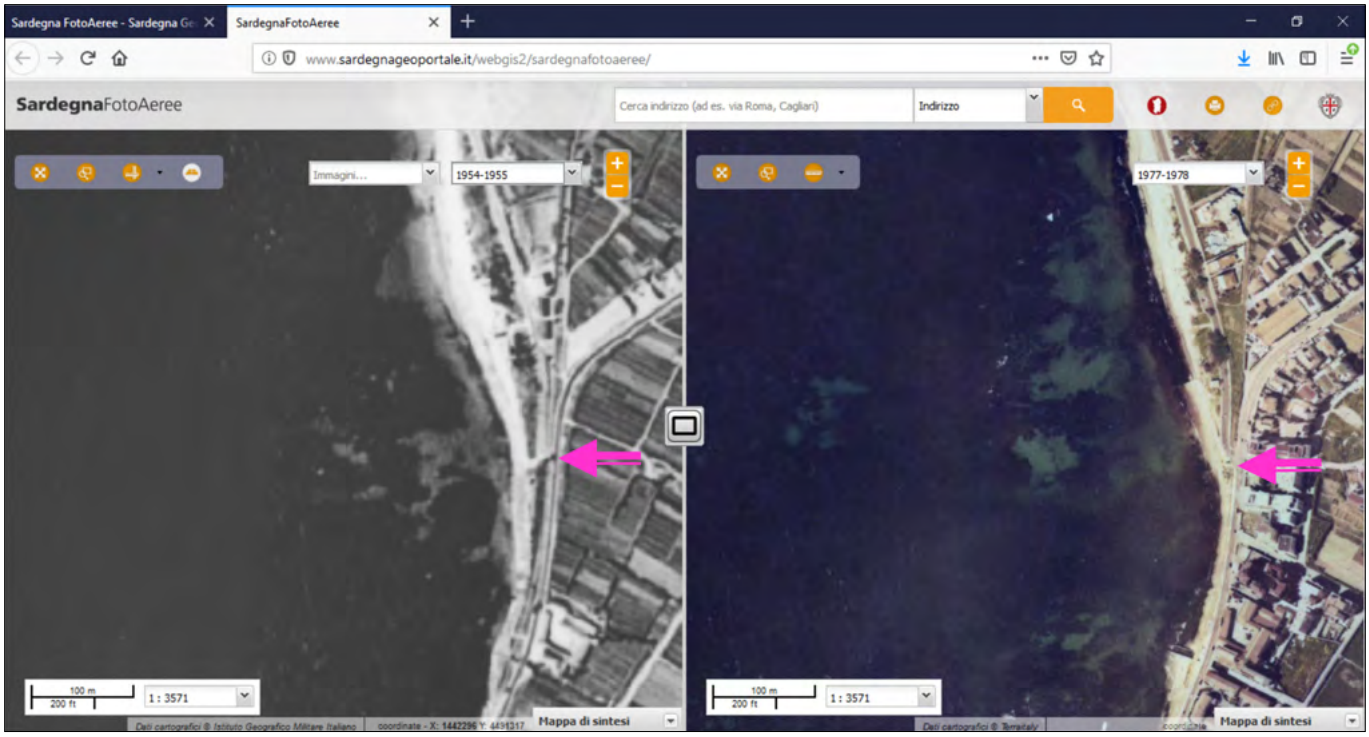


Figura 5. Confronto 1954 (Sx) 1977 (Dx). Il limite Sud della falcatura sabbiosa (indicato con freccia) era sitauato in corrispondenza della fermata ferroviaria di San Giovanni, più o meno sulla trasversale del settore in cui la linea ferroviaria intersecava la strada litoranea.

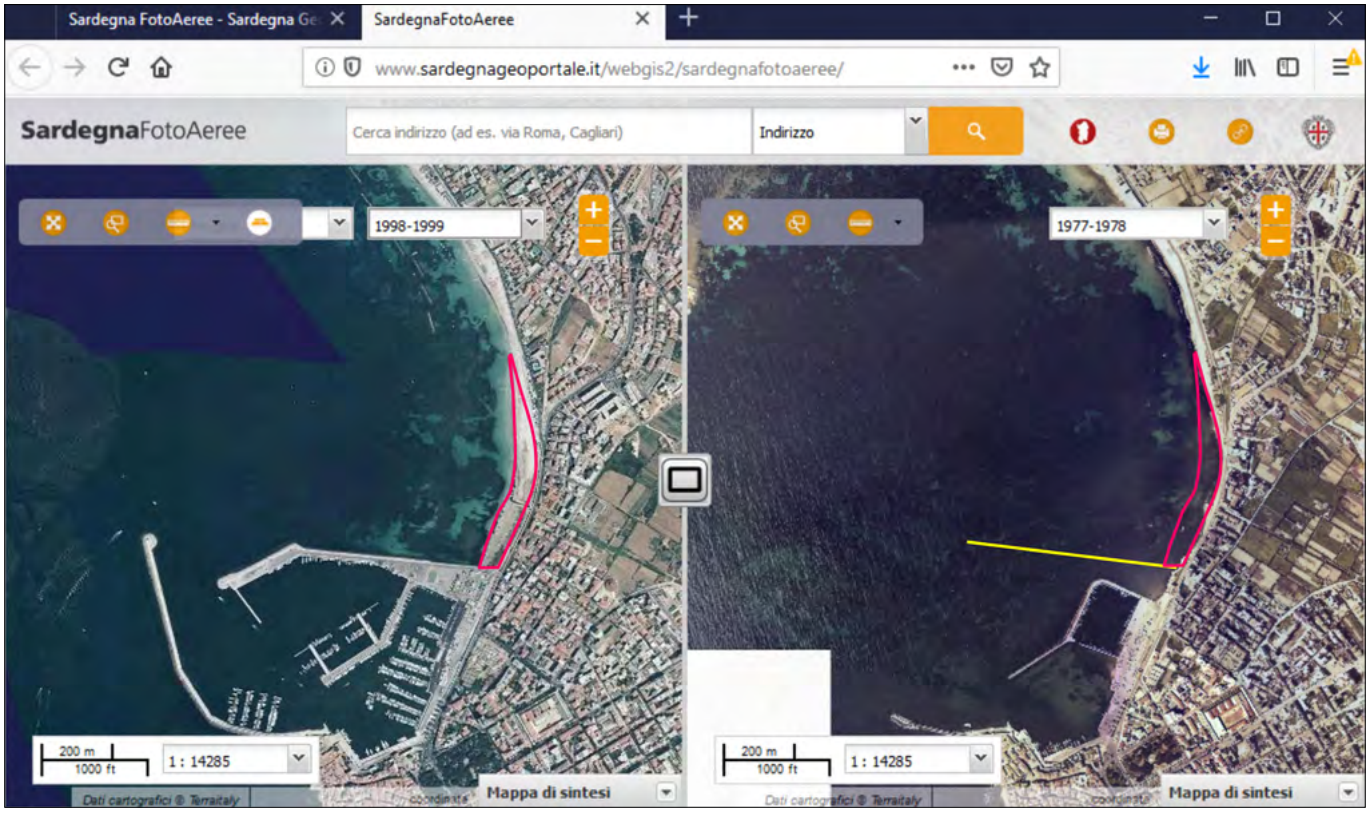


Figura 6. Confronto diacronico 1998 (sx) 1977 (Dx) con evidenziata in giallo la traccia del nuovo molo di sottoflutto e in fucsia la nuova superficie occupata da spiaggia, corrispondente a circa 4ha, con progradazione media di dell'ordine dei 50m trasversali.

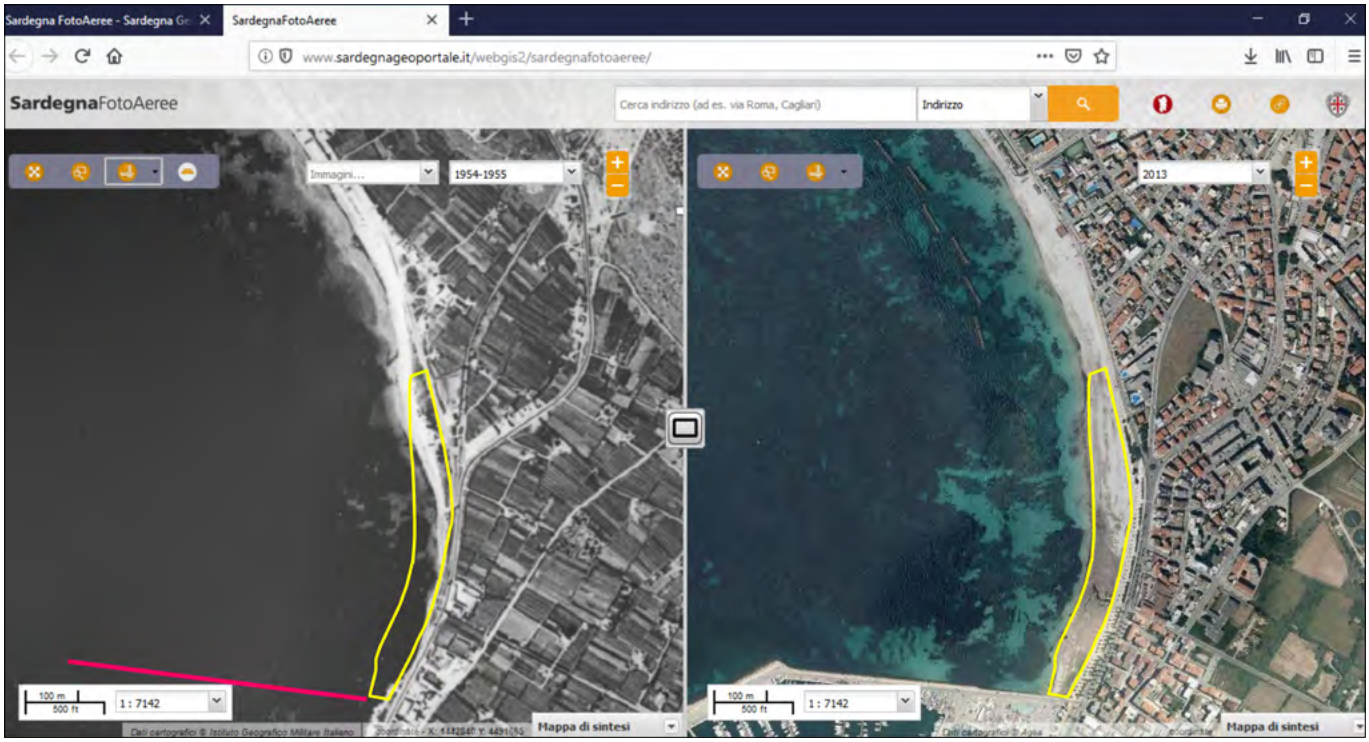


FIGURA 7. Confronto diacronico 1954 (sx) 2013 (Dx) con evidenziata in rosso la traccia del nuovo molo di sottoflutto e in giallo la nuova superficie occupata da spiaggia, corrispondente a circa 4ha, con progradazione media di dell'ordine dei 50m trasversali.

Va da sé che anche la spiaggia sommersa tenda quindi a corroborarsi progressivamente di sedimenti la cui stratificazione progradante farà progressivamente avanzare ancora la linea di riva.

Ne consegue che le sabbie, intrappolandosi definitivamente, vengono altrettanto definitivamente sottratte allo scambio morfodinamico della spiaggia. Per di più in un'area che allo stato attuale è perennemente interdetta alla balneazione per specifici divieti (area portuale; inquinamenti stagionali connessi con la foce del canale San Giovanni).

Già questo aspetto, dunque in termini gestionali, considerato il budget deficitario dell'intera Unità Fisiografica per assenza di ripascimento naturale da torrenti, dovrebbe far pensare di per sé al periodico ricorso ad un manutenzione ordinaria mediante il prelievo sedimentario dalla spiaggia sommersa e nel caso anche da quella emersa con trasferimento dei volumi nelle aree in deficit morfologico (per arretramento o depressione del profilo; vedi sotto-tratto C, Fig. 8).

Per le stesse ragioni idrodinamiche che determinano morfodinamica progradante di sedimenti minerali, tale area diviene luogo preferenziale di deposito primario di sedimenti vegetali di P.o. a seguito di mareggiate invernali da qualunque direzione. Tali depositi, in quanto flottanti possono tuttavia essere rimaneggiati da qualunque ondazione significativa a fini erosivi (comprese le diffrazioni da Libeccio, SW) e dunque trasportati e ridepositati da correnti in scaduta anche medio basse in direzione Nord (sotto-tratto B) e soprattutto verso il sotto-tratto C, ossia a valle delle scogliere di protezione emergenti. Qui si manifesta la periodica concentrazione preferenziale terminale dei resti vegetali flottanti che consegue dalle idrodinamica circolare, a sua volta derivante dalle interferenze del ridosso fornito dalle scogliere e dei bassifondi di Punta del Paru. Le mareggiate invernali tendono dunque a spostarvi resti di Posidonia primaria che pur potendo venire rierosi in parte sono subito ripristinati dal riciclo dei depositi rimaneggiati meridionali. Il sedimento di Posidonia peraltro, nel sotto-tratto C, con tutta evidenza penetra e si diffonde entro la berma per effetto del *run up* in quanto il profilo trasversale della spiaggia è alquanto basso e piatto con tendenza concava, a riprova di un importante deficit volumetrico.

b) Il limite Nord del sotto-tratto C di SUG1 è definito lungo un breve segmento di 200m in corda (sotto-tratto B) dove vanno a interagire nelle varie configurazioni ondose e quindi idrodinamiche, le periodiche tendenze retrocedenti della linea di costa legate all'esposizione dei vettori trasversali diretti *cross-shore*, per il venir meno dell'effetto protettivo trasversale delle barriere e quelle progradanti, legate all'effetto intrappolamento dei vettori longitudinali *long-shore*. Si tratta dunque di una zona di transizione con morfodinamica ambivalente (vi si generano due cuspidi lobate che oscillano periodicamente), sintesi di due opposte tendenze e dove in ogni caso tendono a sfumare quelle manifestamente progradanti che da qualche decennio fanno avanzare la linea di costa nel sotto-tratto A). Si noti che l'acuirsi della concavità sul profilo costiero longitudinale, per effetto della cessazione della protezione della scogliera, si evidenzia simmetricamente anche al limite Nord del sotto-tratto C), dove tuttavia gli effetti sono decisamente più accentuati (di tale fenomeno attesta infatti, come abbiamo visto, l'arretramento della linea di riva, già a partire dal contatto con la scogliera in massi sul campeggio Mariposa a Sud dell'Ospedale Marino.

c) Ancora più a Nord del tratto descritto, lungo la corda di 900m congiungente la sua estremità con l'ingresso in mare della protezione in massi presso il campeggio Mariposa, si delinea il sotto-tratto C) probabilmente il più controverso e ricco di problematiche della SUG1 oltre che quello storicamente più soggetto a valorizzazione turistica-balneare per la concentrazione delle concessioni sul DM. Semmai qui i confronti diacronici 1977 - Attuale mostrano una certa qual invarianza o al più una debole retrocessione, associata tuttavia ad una manifesto abbassamento della quota della berma con incremento della concavità o comunque della depressione complessiva del profilo longitudinale. Tale abbassamento nella parte interna della berma ordinaria è non minore di 0,60m Questo assetto si rivela soprattutto a partire dal traverso della prima superficie in concessione a partire da Sud e permane fino al termine della SUG1. Esso diviene una causa predisponente della deposizione e soprattutto della penetrazione trasversale del run up, in caso di mareggiate intense e conseguentemente dei sedimenti vegetali a Posidonia. Il profilo trasversale sovra-escavato fornisce la condizione morfologica predisponente per l'inondazione marittima in caso di mareggiata da Libeccio e Ponente e ciò, si badi, avviene a dispetto della protezione fornita dal 1983 dalle barriere antistanti il tratto (tali barriere peraltro appaiono piuttosto danneggiate e necessiterebbero da tempo di una manutenzione straordinaria quanto meno a rifiorimento delle quote sopra il livello del mare)[5].
La linea di riva dunque, nella correlazione in ortofoto non appare particolarmente retrocedente ma se si fa riferimento all'esame morfologico sul terreno, le volumetrie trasversali della spiaggia appaiono piuttosto compromesse praticamente lungo tutto lo sviluppo longitudinale. La superficie esposta non ospita le aliquote fini di un tempo (quelle che per capirci, venivano utilizzate dai bagnanti e dagli stessi stabilimenti storici, per le cosiddette sabbiature) ed anche d'estate è sempre piuttosto indurita e meno scabra per effetto del venir meno della sabbia asciutta (emerge dunque il contatto con l'acqua di mare). Ciò deve mettersi in relazione soprattutto alla quota estremamente depressa della spiaggia emersa e tale da risentire il contatto col livello idrico marino (almeno sul fronte di qualche metro più prossimo alla riva mentre più a monte l'umidità potrebbe persino spiegarsi con la bassa soggiacenza della falda freatica ben localizzabile nel sottosuolo di tutto il settore costiero urbano). Il degrado morfologico tessiturale dell'area corrisponde in ogni caso così visibilmente allo spazio delle concessioni DM che assai difficilmente può confutarsi l'ipotesi che per la gran parte sia da considerare la conseguenza diretta delle lavorazioni circa ventennali legate alla rimozione dei resti di fogliame di Posidonia oceanica, essendo per il resto derivato dalle ultradecennali perdite per deflazione e frequentazione balneare.

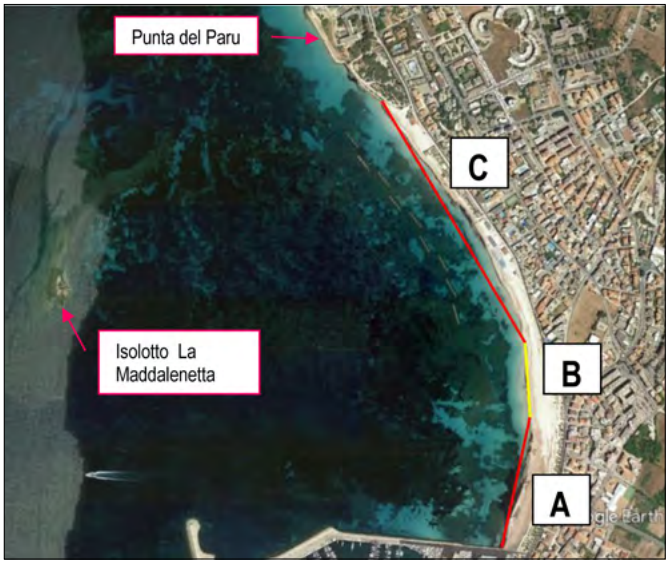


Figura 8. Sotto-tratti di riferimento in SUG1.

Queste lavorazioni, per come oggi sono contemplate in base alle regole ("Indirizzi") impartite dalla RAS, oltre a debilitare stagionalmente i volumi sabbiosi, a causa dell'asportazione di aliquote consistenti di sabbia (in particolare le granulometrie fini meno inclini a separarsi dal fogliame), per il tramite dei volumi dei materiali rimossi, hanno determinato il rimaneggiamento di sedimenti e fogliame che ha stagionalmente generato, a sua volta, rimestamento tessiturale e commistione innaturale (ossia non selezionata dall'azione marina) dei sedimenti stessi con frange organiche non stratificate (come nel caso di naturale azione trattiva) che a loro volta incidono sulla struttura tridimensionale della spiaggia stessa, favorendone la permanenza dell'umidità.

Rimane il fatto che tale tratto è quello reiteratamente soggetto alle azioni dei mezzi meccanici, talora anche cingolati (data la superiore magnitudo dei depositi vegetali).[6]

Questa stessa locale commistione assai evidente entro la fascia di spiaggia più soggetta alle deposizioni e dunque alle rimozioni, ossia la berma nel *Fore-shore*, ha del tutto deturpato la struttura della spiaggia stessa, favorendone oltremodo la depressione e dunque rendendola a sua volta più vulnerabile soprattutto alle azioni di ondazione marina più che all'erosione in senso stretto (è noto che la spiaggia umida a parità di altre condizioni è meno esposta a tale processo), in particolare l'azione penetrante del frangente (*Run-up/Set-up*). La conseguenza generale di questo carico di antropizzazione, ivi compresa la totale assenza di fogliame di posidonia sparpagliato che fungerebbe da ulteriore fattore d'incremento della scabrezza (cosa questa che incide soprattutto sulla deflazione), è l'incremento dell'ampiezza trasversale della *swash zone* laddove vi sia spazio (cioè assenza di strutture); mentre laddove sussistono strutture pertinenziali che irrigidiscono il settore, l'effetto morfologico più evidente, al termine, è l'ispessimento del fronte dei depositi vegetali nel corso delle mareggiate invernali.

5 Questa situazione è stata di recente messa in evidenza per altro verso, anche nello studio idraulico marittimo di Postacchini et al. (2019).

6 L'uso dei mezzi cingolati è proibito dalle norme regionali ma viene autorizzato in questo settore dal competente servizio Demani dell'Assessorato Enti Locali, Finanze e Urbanistica della RAS.

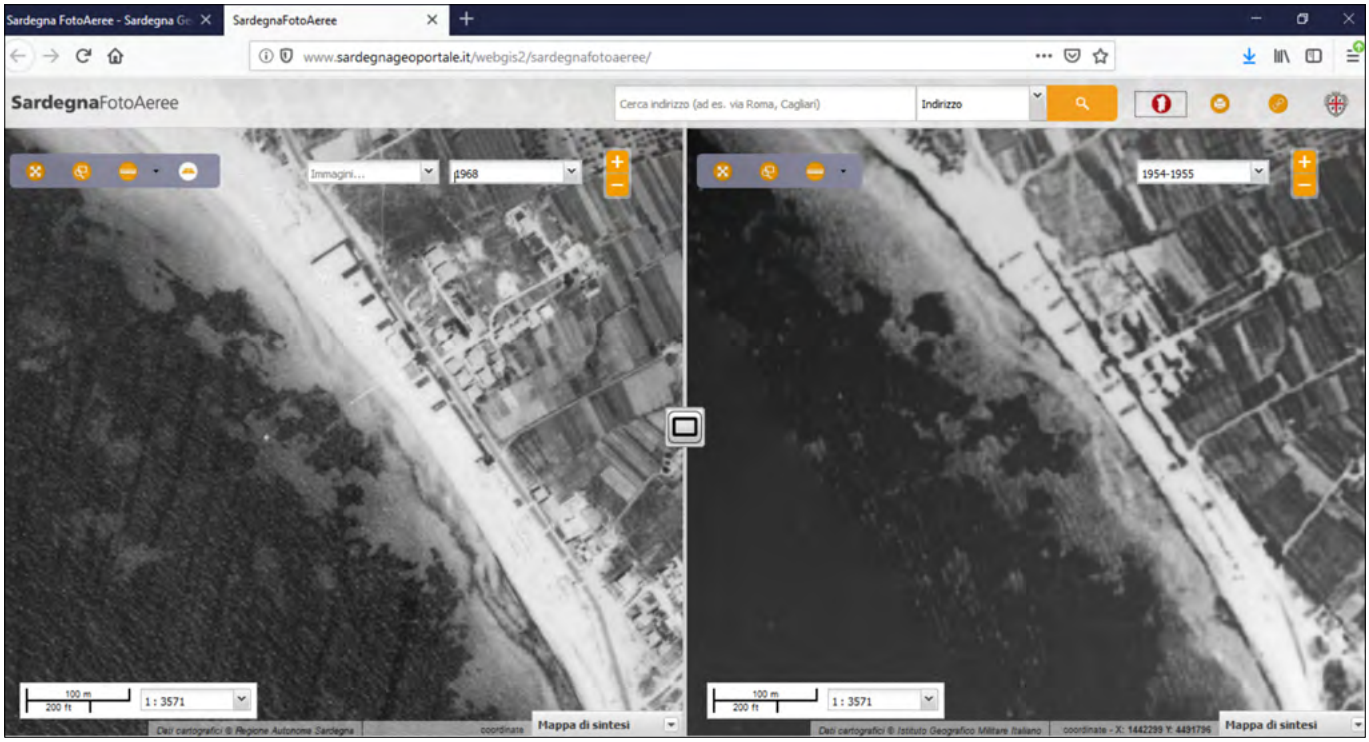


FIGURA 9. Confronto 1968 (Sx) 1954 (Dx). Profilo longitudinale della spiaggia a barre e robuste cuspidi lobate.

Questo è quel che accade per esempio in corrispondenza della concessione storica (1934) del Lido di Alghero. In sostanza i resti vegetali qui si espandono liberamente in spiaggia nella misura in cui possono sostituirsi ai volumi mancanti di sabbia mentre aggradono nel settore dove sono presenti i manufatti. Oggi sono quindi essi a fornire la compensazione morfo-sedimentaria un tempo esercitata dallo scambio con la duna (di fatto praticamente scomparsa, salvo che in un relitto subito a Nord dell'ultima concessione del sotto-tratto) lungo tutto il lido. Di conseguenza i sedimenti a Posidonia sono praticamente divenuti il calco dei volumi mancanti e dunque in linea di principio, al netto dei surplus provenienti dall'erosione degli stoccaggi provvisori, documentano proporzionalmente il deficit volumetrico che in questo sotto-tratto si è generato, a prescindere dalla retrocessione della linea di riva (che in realtà non è documentata, se non altro come in diversi altri tratti).

Dove non hanno la possibilità di espandersi riducendo gli spessori, i depositi di P.o. ovviamente aggradano, ossia ispessiscono, secondo il condizionamento dell'impatto dei frangenti i quali, per progressivo aumento locale di riflettività dell'onda frangente sulle berme vegetali, tendono a sollevare il fronte più prossimo a mare, erigendo banchi decimetrici, fino a vere e proprie barriere vegetali (in questo settore si può arrivare ordinariamente a superare 1,5m).

Queste ultime dovrebbero per questo essere chiaramente distinte dalle berme vegetali di qualche decimetro (ma anche questo criterio distintivo con finalità gestionali, si stenta a farlo comprendere alla RAS). In ogni caso su questo tratto si riscontra un caso palesemente patologico di deposizione di Fogliame di Posidonia oceanica.

Si noti che dal confronto con le molteplici foto d'epoca reperibili in http://www.lidodialghero.it/storia.html, il deficit sedimentario si rivela assai più esplicitamente nel settore sommerso della spiaggia che in quello emerso. In

FIGURA 10. Tratto dove la deposizione da sedimenti di Posidonia oceanica tende a concentrarsi e a permanere nel corso del tempo.

particolare emerge come sia venuta meno, anche in assetto di bel tempo (ossia in Profilo estivo) una profonda (nel senso di pronunciata) area di bassifondi sabbiosi che determinava una netta linea di lieve frangimento in condizioni di quasi calma, lungo tutto lo sviluppo del sotto-tratto B. Si trattava cioè di una cospicua barra posizionata nel settore di *Near shore* che oggi non ritroviamo più per dispersione e approfondimento e soprattutto per allontanamento *Long-shore*. Così come del resto oggi è chiaramente venuto del tutto meno l'assetto a macrocuspidi presente nel corso degli anni '50 che ha avuto come effetto un'innaturale rettificazione della linea di costa.

È del tutto evidente che, sul piano storico, siamo di fronte ad un caso di palese squilibrio geomorfologico dove concorrono più cause, a cominciare dalle artificializzazioni del paraggio costiero ma dove è del tutto evidente che l'attuale metodologia gestionale, si rivela drasticamente ca-

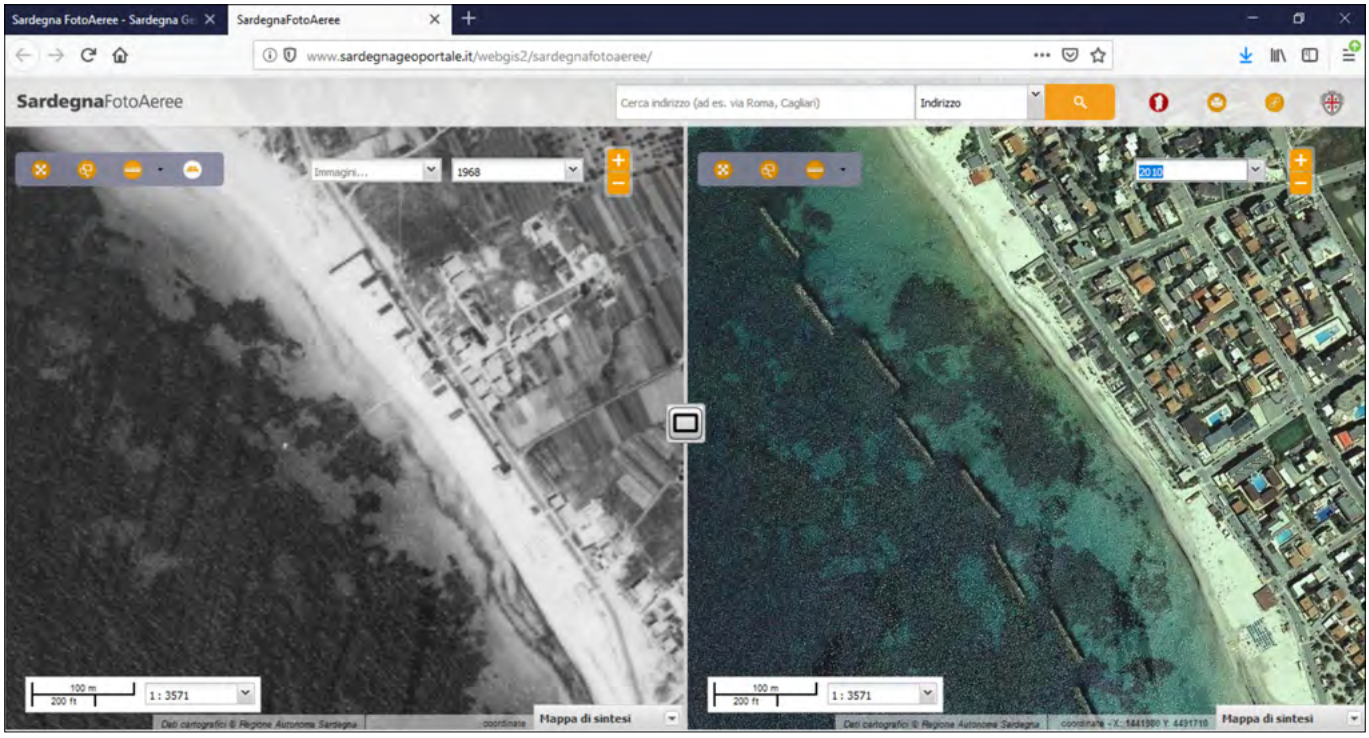


Figura 11. Confronto 1968 (Sx)-2010 (Dx). Si noti la retrocessione relativa della linea di costa, ma soprattutto la rettificazione e la scomparsa delle ampie cuspidi lobate in spiaggia sommersa che genravano i bassifondi.

rente sotto ogni punto di vista, al punto tale che il termine gestione stesso appare inadatto, in quanto di fatto non vi è documentazione di appropriate attività gestionali.

È proprio questa l'area dove la rimozione della deposizione di resti di P.o. provoca i maggiori effetti deleteri dal punto di vista geomorfologico ma, paradossalmente è questa l'area dove la si richiede con più insistenza e determinazione anche in ragione del surplus deposizionale derivante dalla scelta dell'Amministrazione di localizzare alla radice del molo di sottoflutto, nel sotto-tratto A, il cosiddetto deposito (o stoccaggio) temporaneo dei materiali provenienti dalla rimozione dei resti di Posidonia degli ultimi 15 anni.

Nel segmento finale di questo sotto-tratto C, compreso fra le pertinenze demaniali ("Lido di Alghero" in s.s.) fino al limite della scogliera aderente al campeggio Mariposa, oltre all'incremento della concavità del profilo trasversale (dove la P.o., non a caso si rideposita sempre anche qui in ragione della sua rimozione), si registra una chiara flessione retrograda della linea di riva. Si tratta in sostanza del segmento dove più si manifesta la retrocessione della linea di riva. Ciò si deve supporre sia, in primo luogo, il risultato della combinazione di due effetti: 1) cessazione della protezione dal vettore *cross-shore*, quindi della maggiore esposizione all'azione ondosa diretta; 2) il maggiore effetto riflettente determinato dalla vicinanza della barriera aderente.

Ma nel contempo a questo occorre necessariamente aggiungere ulteriori due processi interferenti:

1. l'accentuazione di tale effetto sulla spiaggia in caso di mareggiata, indotto dal venir meno della protezione aderente in massi dislocata a partire dal campeggio Mariposa;
2. un locale incremento della velocità di deflazione eolica al suolo (cfr. "*effetto venturi*") derivante dalla configurazione morfo-topografica che favorisce l'allontanamento per deflazione delle frazioni sabbiose più fini (<< 0,25mm).

Figura 12. Profilo estivo della spiaggia al Lido di Alghero (sotto-tratto C) alla fine degli anni '50. Le frecce indicano la linea di frangimento alle brezze lungo i bassifondi sabbiosi.
http://www.lidodialghero.it/storia.html

Figura 13. Immagine degli anni '40 che mette in evidenza le barre cuspidate e il saliente verso Punta del Paru (dx foto).
http://www.lidodialghero.it/storia.html

FIGURA 14. Altra immagine degli anni '40 del Lido. Si noti fin dove i bagnanti si spingevano a piedi.
http://www.lidodialghero.it/storia.html

Anche detto segmento, in virtù del danneggiamento strutturale del profilo trasversale e longitudinale, è deficitario a tal punto di sedimenti da determinare anche qui paradossalmente la condizione più favorevole alla deposizione e alla stabilizzazione della berma in fogliame di Posidonia; cosa questa che secondo l'attuale impostazione rende necessarie le massicce rimozioni di depositi vegetali le quali a loro volta rigenereranno lo squilibrio morfologico che secondo un surreale circolo vizioso attrarrà volumi crescenti di sedimenti vegetali galleggianti.

ANALISI DI PUNTA DEL PARU AL LIMITE FRA SUG1 E SUG2

Punta del Paru fa da delimitazione fisica fra le due SUG. Anche per questo la morfodinamica che vi si genera va analizzata specificamente. I bassifondi antistanti la Punta fanno da raccordo subacqueo con l'isolotto di La Maddalenetta ed evidenziano l'importanza del controllo geologico sia sulla batimetria sommersa che sull'assetto complessivo delle Sub Unità Fisiografiche in cui l'Unità stessa è distinguibile. È inoltre di tutta evidenza il ruolo dell'isolotto di principale vertice di diffrazione per la propagazione del moto ondoso nell'Unità Fisiografica. È proprio con la sua presenza in quella specifica posizione che si spiegano gli equilibri geomorfologici che hanno dato luogo all'assetto a doppio arco dell'Unità Fisiografica, spiegabile in base ad una idrodinamica polarizzata secondo due circolazioni antitetiche quella a Sud in senso orario e quella a Nord in senso antiorario.

Dallo studio dei fenomeni degli ultimi 40 anni non passa inosservato, quanto meno, che il tratto subito a Nord del Promontorio del Paru nel litorale di Maria Pia, collocato quindi nella SUG2, abbia subito intensa (rapida e profonda) retrocessione valutabile in circa 30m metri (Fig. 15). Esso si configura attualmente come quello di più grave dis-

FIGURA 15. Inizio SUG2 a NW di Punta del Paru, con ripresa verso Nord; danni strutturali presso concessione DM (La Baia dei Venti) dovuti a mareggiata del 2018 e profonda erosione del corpo dunale sullo sfondo. Anche in questo caso la Posidonia oceanica si dispone a calco dei sedimenti allontanati dal profilo di spiaggia. L'incremento erosivo deriva dalla presenza di opere di difesa aderenti che rendono più riflettente il tratto della spiaggia sotteso.

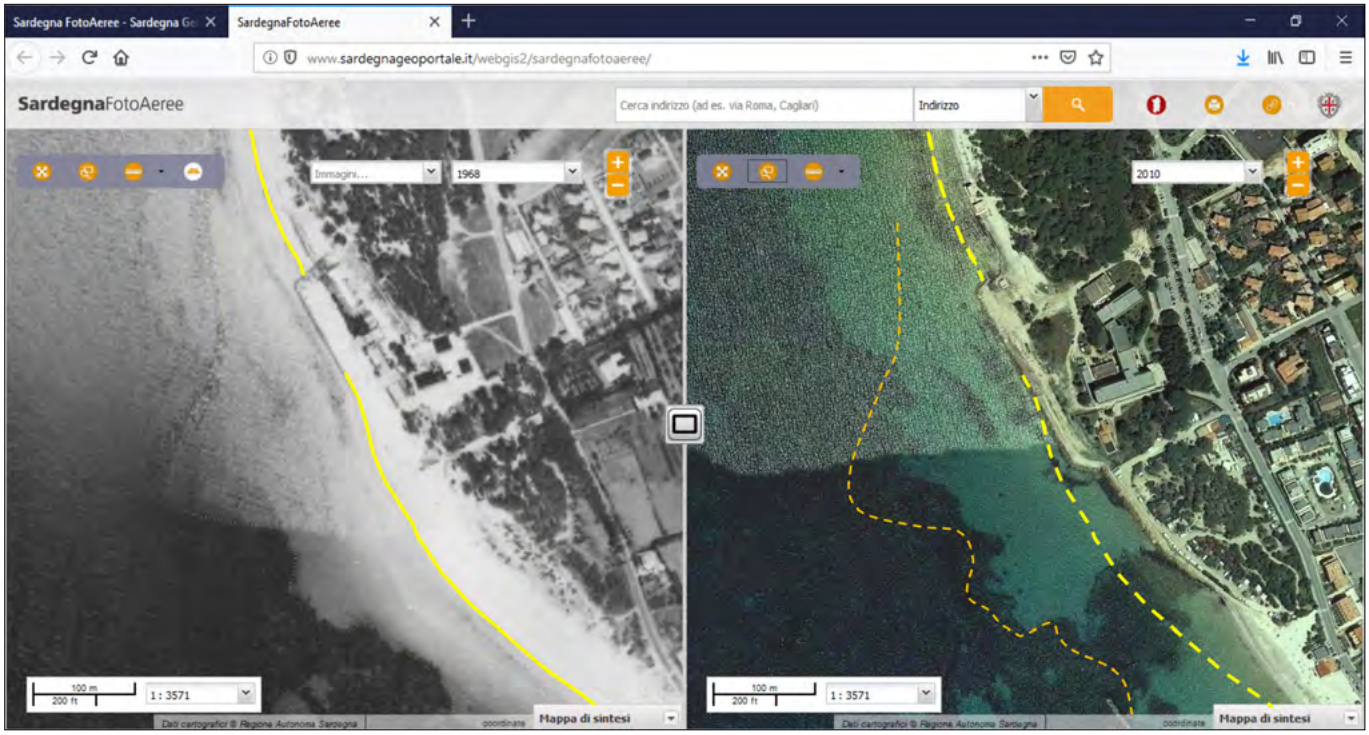


FIGURA 16. Confronto 1968 (Sx) 2010 (Dx).

sesto e di maggiore vulnerabilità nei confronti del pericolo erosivo; a maggior ragione se si considera l'effetto calmierante e compensante sulla retrocessione della linea di riva dell'erosione a carico dell'imponente sistema dunare (qui con le quote massime un tempo di h ≈ 15m). Ugualmente nella Parte Sud del promontorio risulta oramai permanentemente cancellata la spiaggia convessa (tombolo) del campeggio Mariposa (-40m) laddove il saliente sommerso persiste stabilmente ma a maggior profondità rispetto al passato (Fig. 16).

Sappiamo che a Nord del promontorio la mareggiata intensa del 01/01/2010 determinò:

- il collasso strutturale del ristorante "il Ginepro" (la struttura pericolante fu rimossa qualche anno dopo)
- la retrocessione di circa 25m della linea di costa nel tratto
- la drastica retrocessione dell'apparato dunare
- l'incremento della retrocessione del tratto retrostante la protezione rigida un tempo riparato (concessione DM Baia dei Venti)

Figura 17. Dissesto strutturale della protezione aderente di Punta del Paru, con esumazione del pietrame di rinforzo retrostante (sullo sfondo Alghero).

La più recente mareggiata intensa del 29/10/2018 ha riproposto senza mezzi termini lo stato di vulnerabilità di questo sotto-tratto A cavallo fra le due SUG, andando a peggiorare la fatiscenza delle protezioni sul lato Nord, mettendovi ancor più in evidenza l'incongruenza di tale tipologie di opere marittime nello specifico contesto, destinato a subire in modo crescente gli effetti delle mareggiate da Libeccio e da Ponente (si sorvola per brevità sugli esiti dei "rattoppi" di tali manufatti fatiscenti e sulla loro "rilettura" geometrica, evidentemente posti in essere nel 2009 a seguito delle mareggiate precedenti, mediante lavori di "pulizia e di riordino" dell'area in concessione[7], ma è di tutta evidenza che questa è gravata da uno stato di degrado geomorfologico cronico, al di là della cosmesi che o per via naturale o per via artificiale può mitigarne le evidenze nella stagione estiva).

Tale tratto dunque si presenta in erosione strutturale (o di lungo periodo), ossia con linea di riva estremamente arretrata nel confronto 2010-1968 almeno lungo lo sviluppo di circa 100m più pertinente alla difesa rigida e soprattutto con profilo della berma ribassato non meno di 0,30m e in palesemente accorciamento rispetto a circa 40 anni or sono. La retrocessione a Nord della linea di riva, al netto della variabilità stagionale è molto spinta, con punte di 50m nel tratto più concavo di 60m dal termine della protezione aderente e di almeno 25 m lungo un vasto segmento fino alle prime concessioni a Nord da cui si stabilizza in circa 10m. Tutto ciò suggerisce che (Fig. 16):

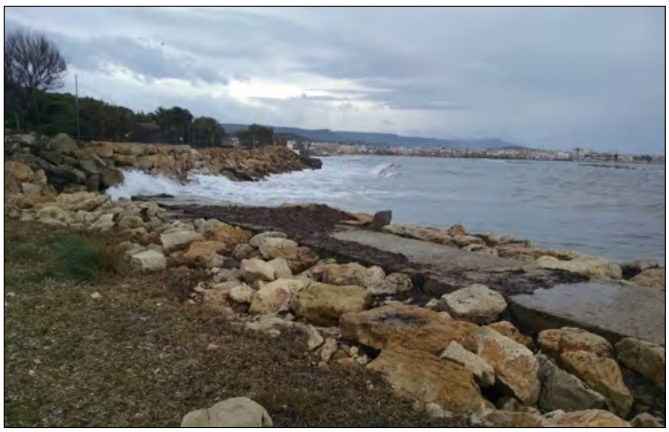


Figura 18. Zona di raccordo fra protezione aderente (1993) Nord in primo piano e Sud (2001) in secondo piano.

- la drastica riduzione del saliente che caratterizzava il promontorio, generando in passato una spiaggia emersa profonda (larga) almeno 40m, si è accompagnata ad un considerevole arretramento anche sui lati del saliente stesso;
- consistenti volumi di sabbia un tempo emersi, spargendosi verso il largo si sono oggi stabilmente collocati in ambito sommerso;
- l'erosione della duna artificialmente stabilizzata di Maria Pia (Figg. da 21 a 24) a partire dal suo piede e il suo arretramento, frenano il rallentamento della dinamica regressiva della spiaggia, ripascendola di sabbie;
- il vettore long-shore a Nord di Punta del Paru, responsabile degli effetti morfodinamici in SUG2, abbia verso opposto a quello che si genera a Sud in SUG1 e sia oggi orientato verso NordOvest;
- il settore a ridosso della protezione aderente ha un differenziale erosivo superiore rispetto al resto del litorale, indotto dalla presenza della protezione rigida e dalla presenza in passato di una struttura oggi demolita per collasso strutturale che a sua volta irrigidiva il lato più a Nord;
- nello spazio sovra scavato di circa 100m di sviluppo longitudinale si genera una trappola sedimentaria per la sovra-deposizione dei resti di P.o. che anche qui sulla berma funge da calco per i volumi mancanti di sabbia poiché, flottando, tendono a sostituirli con facilità dato che penetrano facilmente col *run up* del frangente d'onda.

La variazione morfodinamica subita in conseguenza della modifica dell'idrodinamica risultante posteriore all'allungamento del molo di sopraflutto del porto, è sta-

7 Prot. Gen. Comune di Alghero n.0023415 del 05/05/2009

ta in seguito ulteriormente esaltata dal frettoloso e quindi controproducente irrigidimento di Punta del Paru. Le difese qui collocate in almeno due precise fasi, in calcestruzzo la prima (1993) a sostegno di quella già presente nel 1968 e in massi calcarei di cava la seconda, hanno portato (dopo l'espansione verso il largo degli aggetti portuali di Alghero), all'innesco di erosioni particolarmente veloci e accentuate a discapito del grande saliente bilobato sommerso con spiaggia progradante dinanzi al campeggio Mariposa (>40m di profondità) e delle dune emerse.

In particolare, la prosecuzione della barriera rigida in massi è stata realizzata a protezione del campeggio Mariposa, nel 2001 dopo gravi mareggiate del 2000. Essa tuttavia oggi giorno non solo impedisce alla spiaggia sommersa di rigenerare per aggradazione il saliente compromesso e il tratto di spiaggia emersa un tempo lì presente, ma, come detto, tende di fatto ad amplificare i vettori cross-shore verso la SUG1, in particolare sul tratto terminale di circa 170m del Lido e del sotto-tratto C (abbiamo visto come quest'ultimo, al termine delle mareggiate invernali, divenga puntualmente sede di robuste deposizioni di sedimenti vegetali che sostituiscono in volume quelli venuti meno in questi decenni in ambito emerso, trovando facile ospitalità, dunque nel profilo di spiaggia particolarmente svuotato).

Figura 19. Retroocessione, profilo piatto e berma vegetale nel tratto eroso l termine di Punta del Paru.

ANALISI DELLA SUG2

La SUG2 ha uno sviluppo in corda di circa 1400m, precisamente di 1370m dal termine della protezione di Punta del Paru (SudEst) all'estremità rocciosa vulcanica che a NordOvest affiora in corrispondenza del termine dello stesso apparato dunare di Maria Pia (qui è stato allestito la seconda area di stoccaggio provvisorio del comune per la gestione della P.o.; Fig. 40).

Complessivamente la linea di riva appare molto arretrata negli ultimi 40 anni, e più ancora, come accennato in precedenza nei primi 100-150 m a stretto ridosso delle difese aderenti di Punta del Paru, dove supera i 40m nel confronto col 1977, pre opere portuali. In questo tratto si è accertato che nel corso dell'evento del 1/01/2010 è stato strutturalmente danneggiato uno storico locale ("il Ginepro"), successivamente abbattuto in quanto pericolante. Nel corso della stagione invernale 2018-2019 (evento del 28-30 Ottobre 2018), si sono avuti ulteriori progressioni dei dissesti erosivi nelle parti più prossime alle barriere aderenti, con danneggiamenti a carico di tutti i manufatti realizzati immediatamente a tergo di queste, entro o ai bordi dell'area in concessione. Molto spinto appare invero lo stato dell'erosione a carico degli apparati dunari che in questo settore sono i più robusti (h≈15m) di tutta la cosiddetta Pineta di Maria Pia (un'opera di forestazione storica degli anni '30 del '900, mirante alla stabilizzazione del corpo sabbioso a vantaggio delle locali attività agricole).

Nel primo tratto di 275m, a Sud del sotto-tratto antropicamente degradato dove sono localizzate le prime concessioni (Hermeu e La Palafitta), il sistema dunare versa in uno stato di grave arretramento con fronti di erosione che si innalzano in certi punti oltre i 3 m, ragion per cui non si può più tecnicamente parlare di erosione del solo piede della duna.

Nel sotto-tratto il profilo longitudinale modale del *nearshore* della spiaggia sommersa si presenta con ampie barre lobate che sfumano e si rettificano verso Nord. La geometria planare della spiaggia nel suo insieme non ha modificato il suo assetto biconcavo verso mare ma la sua metà settentrionale appare certamente più rettificata, così come meno evidente risulta la convessità stessa (assetto megacuspidato) delle barre lobate sommerse. Questo potrebbe essere tradotto come un nuovo equilibrio con barre meno spesse/concentrate del passato e maggiore distribuzione dei sedimenti nella cella sedimentaria. Nel complesso le volumetrie morfodinamicamente attive in ambito sommerso appaiono molto cospicue e non vi sono allo stato ragioni per supporne un loro definitivo allontanamento dalla cella per idrodinamica. Andrebbe computata al massimo una perdita per l'azione antropica del calpestio.

La deflazione in questo contesto non può produrre significativi risultati negativi sullo stock perché non allontana irreversibilmente il fino. Certamente, data l'assenza di manufatti d'irrigidimento, i profili stagionali divergono nettamente, con differenze di ampiezza della spiaggia emersa di decine di metri, fra stato invernale ed estivo. Le Figure successive attestano della condizione posteriore all'acme della mareggiata del 1/02/2019.

Figura 20. SUG2. Si noti l'imponenza dell'apparato dunare. La orda di 1370m evidenzia la maggiore concavità della falcatura sabbiosa. L'ampiezza max trasversale della duna artificializzata è di 170m. le frecce rosse indicano i tratti più con maggiori tendenze regressive. In blu il verso del vettore *long-shore*.

Figura 21. Erosione massiva sul corpo dunare (settore ex Il Ginepro). La retrocessione della riva è superiore ai 40m.

Figura 22. SUG2 Stato di retrocessione del sistema dunare.

Figura 23. SUG2: Oltre la metà della SUG in direzione Nord. Il *run up* invernale in assenza di mareggiate è prossimo al cosiddetto piede della duna (che in realtà è sempre la traccia di un inviluppo erosivo e non costruttivo, quindi non rappresenta affatto il vero piede della duna.

Figura 24. SUG2: Fondazioni non amovibili di strutture amovibili posizionate in aree palesemente inondabili per azione ondosa invernale, a metà circa della SUG.

Figura 25. SUG2: gli apparati dunari di Maria Pia mostrano ricorrenti strati a fogliame e a tritume di fogliame di Posidonia.

Figura 26. SUG2: l'erosione della duna mette in evidenza che gli apparati radicali delle piante che stabilizzano la duna concrescono facilitati all'interno di strati ad egagropili della duna stessa a conferma del ruolo di questi sedimenti vegetali nella fisica e nell'habitat di spiaggia.

ANALISI DELLA SUG3

La SUG3 ha uno sviluppo in corda poco più di 1000m (1061m) dall'estremità rocciosa NordNordEst di SUG2 all'estremità della falcata attuale, adagiata a metà del molo di sottoflutto del porto turistico di Fertilia.

Al suo interno l'elemento morfodinamico più riconoscibile è il risultato costruttivo del vettore long-shore che porta tutto il settore più occidentale a progradare assai velocemente in direzione Sud per effetto dell'intrappolamento operato dall'aggetto portuale e dall'ulteriore ridosso offerto dal prolungamento del molo guardiano a partire dagli anni '90 (Figg. 28, 29 e 30).

I bassifondi sabbiosi che si sollevano aggradandosi e protendono verso la bocca portuale, sono da considerarsi pertanto senza il minimo dubbio il corrispettivo volumetrico di quanto progressivamente venuto meno nel sottotratto sub rettilineo SudEst della falcata, prima dell'inizio della sua rotazione antioraria e della conseguente formazione della concavità. Il sotto-tratto sub rettilineo orientato SudOvest-Nord Est è invero contrassegnato da due concavità non marcate, attestanti però uno spiccato stato di sofferenza erosiva (Fig. 27). Nella più orientale la retrocessione costiera, in parte sollecitata dalla sporgenza rocciosa ha messo in evidenza ulteriori lembi di sostrato roccioso terziario e pleistocenico ed esumazione di manufatti antichi. Si è pertanto generata una piattaforma (terrazzo) d'a-

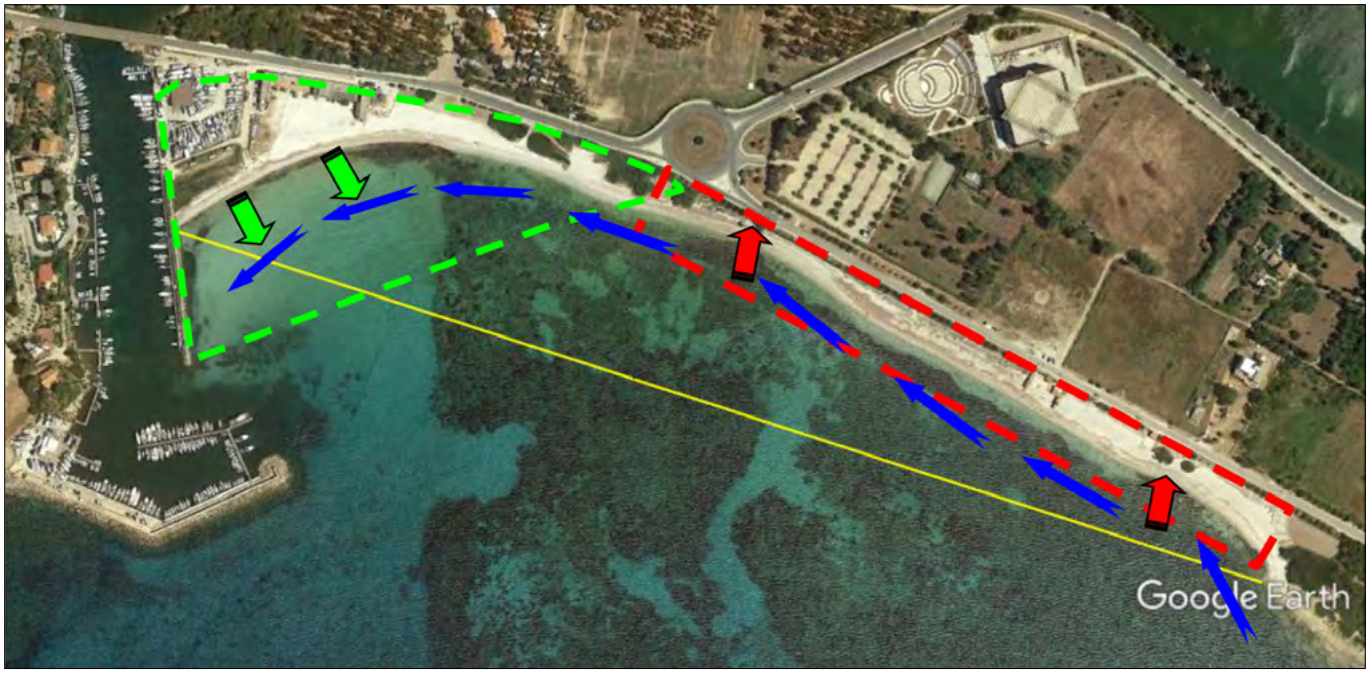


Figura 27. SUG3: Sintesi delle morfodinamiche in atto nella SUG3. In Rosso tratto eroso con maggiori tendenze regressive (Frecce rosse). In verde pro gradazioni. In blu il vettore *long-shore*.

Figura 28. SUG3- Sottotratto progradante, sede di ricorrente berma strutturata in resti di Posidonia, soggetta a rimozione artificiale. Sabbia e egagropili stratificati dopo fase erosiva.

brasione, che smorza ulteriormente i frangenti di tempesta e che dunque in qualche misura tende a mitigare l'energia nell'estremo ridosso. Quella centrale invece dà luogo secondo l'Ammnistrazione comunale di Alghero al caso di maggiore pericolo d'inondazione marittima locale, ossia a maggiori probabilità di sormonto del *run up* oltre la spiaggia[8]. Com'è noto il Comune ha stabilito fin dal 2008 di non dover procedere in quest'area (solo in quest'area, si badi) alla rimozione delle deposizioni di P.o. e semmai indicando questo segmento come quello su cui concentrare materiali a seguito di vagliatura[9] (Figg. 31 e 32). Si è trattato in sostanza di una forma di manutenzione straordinaria/ periodica del profilo di spiaggia. Sappiamo tuttavia che anche nel corso del 2004 quest'area fu oggetto di una manutenzione straordinaria con *by pass* di sabbie (e purtroppo anche materiali di demolizioni) provenienti dai lavori di sistemazione del Lungomare Urbano successivi alla dismissione della ferrovia locale.

Tutto il sotto-tratto longitudinalmente concavo sul lato Nord-Ovest attesta al contrario del precedente di tendenze a creazione di arenile. Qui la progradazione nei 60 anni circa dal 1954 ad oggi si manifesta con incrementi fino a circa 60 m sul lato più ridossato, sul quale peraltro avanzano altrettanto velocemente i flussi che vanno ad innalzare il fondo della bocca portuale. Per questa ragione, come si è detto, questa porzione dello specchio acqueo di Fertilia andrà nuovamente sottoposta a dragaggio col rischio estremo, anche stavolta (la prima nel 2002) di perdita di non meno 10.000 di mc di sabbie provenienti dai settori orientali in erosione. L'amministrazione, in termini gestionali,

Figura 29. SUG3: Inizio sottotratto progradante. Nuova Posidonia rimaneggiata da altri settori più a Est.

8 Il Comune di Alghero al momento declina in questo modo il concetto di erosione costiera.

9 Per questa stessa ragione l'area è divenuta area di conferimento di parte degli esuberi derivanti dalla vagliatura di una quota del deposito temporaneo di Cuguttu.

Figura 30. SUG3: Processi di ricoprimento naturale con sabbia e egagropili di porzioni erose di berma vegetale.

Figura 31. SUG3: Terminale Est del sotto-tratto progradante,con funzioni di area di trasferimento più o meno stabile. La battigia priva di Posidonia attesta di questa tendenza modale. È allestito il cantiere (foto 2019) per il riposizionamento nel tratto in erosione.

Figura 32. SUG 3: Tratto esposto ad arretramento (erosione strutturale) soggetto a Gennaio 2019 a posizionamento forzato di esuberi da vagliatura di Posidonia del sito di Cuguttu (Fig. 40).

dovrebbe fare di tutto per fare in modo che una tale sciagura gestionale non abbia a verificarsi data la non surrogabilità di tali sedimenti nel bilancio dell'Unità fisiografica. Le condizioni sono tali semmai da pensare di perseguire anche in questo caso una manutenzione della SUG3 mediante travaso artificiale di sedimenti (bypass) dalle aree con deposizione positiva a quelle con deposizione negativa. Senza contare che, sempre in termini di gestione sistemica della SUG3 e dell'intera Unità di Alghero, non è da scartarsi l'ipotesi che nel vasto corridoio di sabbie che si protende a Sud di Fertilia sussistano aliquote volumetriche eccedenti più che sufficienti per manutenere periodicamente le situazioni di dissesto più conclamate, mediante prelievi con sorbone, in mancanza di altre soluzioni o dove tali soluzioni siano più onerose.

Le Fig. 33, 34 e 40 forniscono il quadro sinottico riassuntivo dei principali processi idrodinamicii ricostruiti e quelli morfodinamici osservati o estrapolati nel corso dello studio.

CONCLUSIONI

Le conclusioni che si possono trarre dallo studio geomorfologico sono le seguenti:

1. È stato verificato che *dissesto e gestione della fascia costiera* rappresentano due questioni piuttosto legate far loro che non possono discutersi in forma totalmente separata. Infatti:

I. le spiagge di Alghero soffrono, da circa 30 anni di dissesti geomorfologici, derivati da squilibri morfodinamici che, in determinati tratti, si sono progressivamente aggravati.

II. tali squilibri sono in primo luogo conseguenza della realizzazione delle strutture aggettanti di 2 opere portuali (Porto di Alghero e Porto di Fertilia, entrambi a finanziamento regionale) e, paradossalmente in uno solo dei due casi, anche delle opere di protezione associate o forzatamente conseguenti agli effetti stessi non previsti di tali opere;

III. le opere aggettanti hanno modificato radicalmente la circolazione idrodinamica della rada, generando (nel caso del porto principale) esaltazione di vettori erosivi in taluni tratti e (in entrambi i casi) trappole sedimentarie in altri;

IV. le dinamiche regressive più accentuate al passaggio fra SUG1 e SUG2 sono quelle in prossimità di opere di protezione radente;

V. nel tempo, la capacità naturale della spiaggia di liberarsi autonomamente delle deposizioni di berma vegetale in SUG1, è stata inibita dalla sovrapposizione di tre meccanismi artificiali:
   - l'ampliamento del porto principale con realizzazione del pronunciato molo di sopraflutto aggettante;
   - lo spostamento verso Est della radice del molo di sottoflutto del Nuovo Porto (in base al nuovo progetto, il porto trasla verso San Giovanni di circa 200m ed il molo passa a sottoflutto);
   - la realizzazione delle barriere protettive dinanzi al Lido di Alghero;

FIGURA 33. SUG1: Dinamica circolare con ondazione da **Libecci**o fra le barriere e la riva, come esito della combinazione dei vettori d'onda incidente (bianca) e diffratta (colorata). Tratteggio F = limite esterno zona di frangimento in burrasca. D = vertice di Diffrazione.

In SUG3 da:

- l'estensione del molo guardiano del Porto di Fertilia.

I. lo stato di sofferenza del litorale, in alcuni dei suddetti tratti viene esaltato dalla reiterazione nel tempo della pratica di rimozione dei depositi a resti di Posidonia oceanica che, per varie ragioni, in prevalenza antropiche, tendono a stazionare nel tempo su battigia e berma più di quanto si registrasse nel passato, tanto in tempi precedenti alle trasformazioni marittime (aggetti portuali e scogliere di protezione) quanto dopo, fino a qualche anno or sono;

II. negli ultimi 15 anni si sono aggiunte a ciò le conseguenze (a parere di chi scrive, in primo luogo in termini morfodinamici e in sub ordine paesaggistici; non sussistono invece prove che dette conseguenze abbiano coinvolto aspetti sanitari) derivanti dalla scelta dell'Amministrazione comunale, del sito di San Giovanni (fra la radice del molo di sottoflutto e la foce dell'omonimo canale) come stoccaggio temporaneo (ma non certo stagionale) delle annuali rimozioni delle berme vegetali di P.o.;

III. i sedimenti di P.o., costituiscono l'unico input sedimentario positivo all'interno delle Unità Fisiografiche dal momento che il trasporto solido dei torrenti sottesi alla laguna, viene da questa intercettato e non concorre a ripascere la costa;

IV. i sedimenti di P.o. che si depositano come berme vegetali hanno assunto la funzione di ripristino naturale dei volumi di sabbia mancanti, tendendo a permanere stabilmente proprio nelle aree a profilo trasversale più debilitato (SUG1-sotto-tratto C; SUG2-subito a ridosso di Punta del Paru).

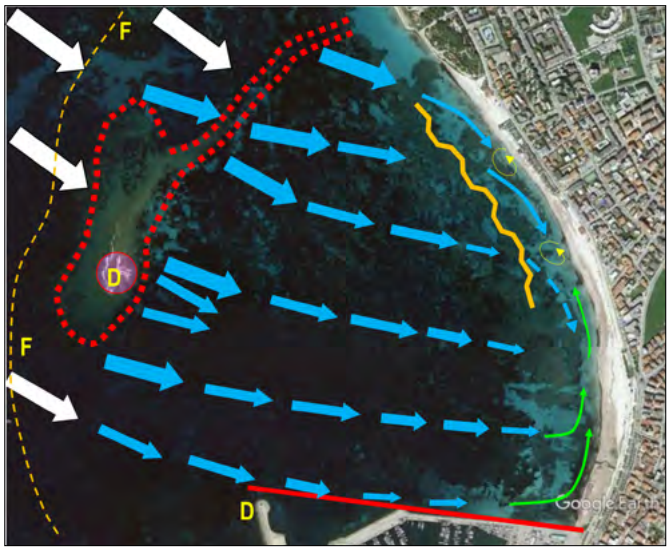


FIGURA 34. SUG1: Dinamica con ondazione da Maestrale fra le barriere e la riva, come esito della combinazione dei vettori d'onda incidente (bianca) e diffratta più riflessa (colorata). Tratteggio F = limite esterno zona di frangimento in burrasca. D = vertice di Diffrazione.

2. Si è accertato che il litorale di Alghero era già soggetto fin dalla prima metà degli anni '80 a processi erosivi strutturali o di lungo periodo particolarmente espliciti, conseguenti al drastico stravolgimento di idrodinamica e morfodinamiche della rada, posteriori all'ampliamento per stralci del porto storico a partire dal 1983.
3. Tali dinamiche deformative hanno condotto alla progradazione di ampi tratti di spiaggia a partire dalle radici dei due moli di sottoflutto portuali e all'arretramento di ampi tratti posizionati simmetricamente rispetto ai bassifondi costieri centrali della rada derivanti dal controllo geologico della Rada.
4. Sul fronte settentrionale, il processo di progradazione della spiaggia emersa e di aggradazione di quella sommersa conducono a periodici insabbiamenti del Porto di Fertilia, i cui dragaggi costituiti da sabbie non inquinate e resti di P.o. in passato sono stati smaltiti in discarica; mentre per quanto è dato sapere oggi, sono incredibilmente destinati a tutto (oltre le 3 m.n. o casse di colmata per nuove strutture portuali) fuorché alla reimmissione nelle aree immerse delle spiagge da cui provengono i sedimenti.
5. L'attuale stagionale prassi gestionale dei depositi di P.o. non può essere considerata, né è di fatto compatibile, quindi, con la garanzia di conservazione della spiaggia sul medio periodo. Tali depositi infatti non solo costituiscono l'unico input sedimentario attivo della spiaggia ma rappresentano comunque una manifestazione di equilibrio del profilo di spiaggia in aggradazione in stato di cattivo tempo. Quindi la loro rimozione genera di per sé (ossia al netto del prelievo di sabbia che in genere è abbondantissimo e nel caso di Alghero è valutabile in circa il 30% in volume e circa il 70% in peso a secco) uno stato di cronico, poiché reinnesca, in funzione del clima ondoso, condizioni cicliche di rideposizione (e dunque di nuova potenziale rimozione).
6. A ben guardare, tale prassi non avrebbe neppure dovuto essere intrapresa, ad avviso di chi scrive, almeno nell'ottica di una interpretazione conservativa della Circolare Ministeriale 2019 (M.A.T.T.M n.8838 del 20/5/2019) in particolare per quel che concerne le opzioni suggerite per la gestione dei depositi e delle barriere vegetali in litorale soggetto ad erosione. Questo in quanto le spiagge algheresi, in particolare il Lido di

San Giovanni e Maria Pia, erano già soggette in vari tratti, a "fenomeni erosivi particolarmente accentuati" come risulta confermato anche da vari riferimenti bibliografici, quanto meno degli ultimi 15 anni (cfr. n.3, 4, 5, 6 8,9, 19, 11, 12 della Bibliografia). Questo fatto, sempre in base ai contenuti della Circolare Ministeriale 2019 (e della precedente Circolare n. 8123/2006, sulla medesima fattispecie). avrebbe potuto e dovuto dissuadere, a rigor di logica, dal procedere con le rimozioni, a meno di non aver deliberatamente deciso di far prevalere sulla salvaguardia del litorale, i soli interessi balneari di breve periodo. Cosa questa che, disattendendo qualunque logica manageriale (nonché, ad avviso di chi scrive, persino il D.Lgsl. 42/2004, art. 131), si è rivelata nel tempo alquanto controproducente.

7. Dinanzi al Lido di Alghero, in corrispondenza dei tratti attualmente più interessati dalla rimozione dei depositi di Posidonia (sotto-tratto C della SUG1), erano state disposte fin dalla metà degli anni '80 barriere di protezione con lo scopo di fronteggiare i vettori *cross-shore* delle mareggiate, accentuatisi in conseguenza della nuova configurazione portuale.
8. Tali barriere mai mantenute (divenute nel tempo più permeabili che in passato, e dunque meno efficaci), unitamente alla vicinanza della struttura portuale di sottoflutto, nella parte più meridionale interna della Rada, nei vari stati di mare al largo, favoriscono la generazione di una idrodinamica circolare che non aiuta la naturale dispersione in mare dei depositi primari di P.o..
9. Sul sotto-tratto A di SUG1 è stato individuato da tempo (2008) uno dei 3 siti comunali "idonei" allo stoccaggio "temporaneo" dei volumi derivanti dalle rimozioni dei depositi di P.o.. (ai sensi della D.G.R. 43/13 del 6/7/2016; Direttiva interassessoriale del 16/5/2017; e Legge regionale 21 febbraio 2020, n.1[10]).
10. I surplus deposizionali di resti di P.o. determinati dall'intrappolamento "naturale" si sommano ai volumi artificiali dello stoccaggio comunale della Gestione della Posidonia e ciò favorisce nel sotto-tratto C la concentrazione, nonché la rideposizione di aliquote volumetriche sottratte per erosione sul sotto-tratto A.
11. Parte di tali volumi, quindi, tende a circolare, stazionare e a ridepositarsi ciclicamente (riciclaggio) nello stesso sotto-tratto per tempi lunghi, poiché l'equilibrio morfodinamico è stato totalmente alterato sia per effetto della variazione idrodinamica che per l'incremento dei volumi di sedimenti vegetali disponibili (non più solo quelli stagionali ma quelli stockati non certo temporaneamente).
12. Come effetto nel tempo di quanto descritto ai punti precedenti, talune aree della SUG1 nel sotto-tratto C, soprattutto quelle interessate da concessioni balneari e in misura minore quelle libere residue, sono divenute sede di massicce deposizioni di berme vegetali durevoli.

Figura 35. Deposizione di P.o. nel tratto progradante di SUG1 (per gentile concessione di A. Beltramo del Lido di Alghero).

13. Le aree soggette con più frequenza alla rimozione della P.o. (anche in ragione della magnitudo delle concentrazioni), corrispondono in larga misura alle parti di spiaggia dinanzi alle 9 barriere parallele realizzate nel 1983 per la protezione di gran parte del sotto-tratto C. Esse sono, non a caso, anche le aree con profilo trasversale più compromesso (ossia svuotato), con palese appiattimento generalizzato e locali concavità conseguenti a deficit volumetrico di sabbie. Tale caratteristica funge da condizione predisponente alla periodica rideposizione dei sedimenti vegetali.
14. Le deposizioni della berma vegetale in tali aree fungono in sostanza da calco dei volumi sabbiosi mancanti e documentano dello stato di deficit strutturale (dunque erosivo) della spiaggia emersa, in tale tratto, peraltro, del tutto priva di duna. Tale stato erosivo è latente laddove si voglia intendere l'erosione soltanto come arretramento della linea di costa. In realtà tale erosione, anche laddove la battigia non arretra per effetto delle scogliere artificiali, è mimetizzata dalla deposizione sistematica di sedimenti vegetali di P.o.. Tale deposizione dunque attesta semplicemente del nuovo stato di equilibrio assunto dal profilo di spiaggia a seguito della perdita per sottrazione artificiale pluridecennale di sedimenti sabbiosi.
15. L'altezza del profilo di spiaggia emersa odierno in corrispondenza della berma ordinaria appare ridotto di non meno 0,60-0,80m, cosa questa che consente al mare di risalire inumidendo la superficie della spiaggia emersa, rendendola estremamente diversa da quella convenzionale di un profilo in salute.
16. Lo stato erosivo della parte terminale a Nord del sotto-tratto C di SUG1 e di Punta del Paru è drasticamente accentuato dalla presenza di barriere aderenti in calcestruzzo e di una scogliera, anch'essa aderente in blocchi di cava, li collocate rispettivamente fra il 1968 e il 2001, oggi generalmente ammalorate e in buona parte del tutto dissestate, specialmente sul lato a Nord del promontorio dove periodicamente rifiorisce il pietrame originario lì collocato a monte delle stesse.
17. La presenza di barriere aderenti su quello specifico tratto ha dunque generato un'accentuata nonché con-

10 Disposizioni sulla gestione della posidonia spiaggiata.

Figura 36. Condizioni della spiaggia posteriori alla rimozione meccanica dei resti di P.o. (per gentile concessione di A. Beltramo del Lido di Alghero).

centrata condizione riflettente con vettore cross-shore orientato al largo. Dal punto di vista morfodinamico, l'originario saliente responsabile della presenza di una falcata emersa convessa, pronunciata almeno 40m rispetto alla battigia attuale, è stato squilibrato a punto tale da rendere al momento impossibile, con tale assetto artificiale difensivo, la rigenerazione naturale, quanto meno stagionale, dell'originaria spiaggia emersa.

18. La spiaggia di Maria Pia (SUG2) appare invece drasticamente soggetta a processi erosivi (cfr. 5, 8, 9 e 10 in Bibliografia) che si manifestano palesemente con classico arretramento della linea di riva. Tale arretramento, via via decrescente verso Nord, assomma a più di 40m negli ultimi 20 anni subito a Nord delle protezioni (cfr. punto 16).
19. Il processo di retrocessione della linea di riva in SUG2 è tuttavia parzialmente compensato dalla drastica erosione a discapito del robusto sistema dunare, stabilizzato da pineta artificiale a partire dagli anni trenta dello scorso secolo.
20. I processi erosivi non si limitano al cosiddetto piede della duna ma investono massicciamente il corpo dunare, fino a coinvolgere gli impianti storici di *Pinus pinea*. I nuovi equilibri, infatti non consentono una progradazione della spiaggia di bel tempo tale da rigenerare stagionalmente una berma modale con ampiezza paragonabile a quella dell'assetto di spiaggia pre opere portuali. Ne consegue che la sua riduzione strutturale esponga inevitabilmente la duna a processi erosivi stagionali molto accentuati con evidente dissipazione dei volumi sabbiosi e dissesto dell'impianto forestale.
21. Non deve meravigliare che in questo settore la deposizione stagionale della P.o. non sia avvertita come criticità dai Concessionari balneari. Infatti il vettore long-shore della circolazione idrodinamica di SUG2, chiaramente definito ed orientato verso Nord, tende regolarmente ad allontanare in tale direzione i resti vegetali, oltre che parte dei volumi sabbiosi.
22. La grave retrocessione storica in atto riguarda tutto lo sviluppo della sub-unità ma decresce con una certa regolarità in direzione Nord ossia secondo il vettore *long-shore* risultante.
23. Salvo che nel punto sovra eroso subito a Nord delle opere aderenti di difesa, in questo settore la Posidonia che si deposita tende ad essere rimossa per via naturale e dunque non costituisce una criticità specifica..
24. I resti delle rimozioni vengono "temporaneamente stoccati" (ma non sono mai stati riposizionati) nei siti storicamente definiti a partire dal 2007 (attualmente 3 per le 2 spiagge principali gestite della Rada). Dal 2019 tali stoccaggi vengono ulteriormente trattati in un impianto di lavaggio (*soil washing*) ubicato a Quartu S. Elena (circa 280Km di distanza da Alghero). L'Amministrazione nel 2019-2020 ha speso 700.000Euro per recuperare circa1250mc di sabbie (25% in volume) di cui 700mc (provenienti da *soil washing*). Tali sabbie sono state riversate nel tratto di spiaggia progradante di San Giovanni, ovvero nell'Arenile in s.s., porzione di spiaggia certamente non in sofferenza. L'attuale amministrazione continua con la stessa pratica e non si capisce cosa impedisca all'amministrazione per ricollocare le sabbie nelle aree di reale origine morfodinamica.
25. Il Comune di Alghero nell'ambito del servizio di rimozione dei resti di P.o. fa tuttora uso del termine Pulizia (*Servizio triennale di pulizia degli arenili di libera fruizione-Triennio 2019-2021*) mettendo così in relazione i resti di Posidonia oceanica alla necessità di PULIRE la spiaggia; ciò contribuisce a rigenerare equivoci ambientali che non giovano alla salvaguardia della spiaggia.

Foto 1. Lido di San Giovanni

Foto 2. Lido di Maria Pia

Foto 3. Lido di Cuguttu

Foto 4. Lido Punta Negra

Figura 37. Tratti di spiagge oggetto d'intervento Comunale di Gestione della P.o.. In blu quelli a cura dei concessionari. Figura tratta da Relazione tecnico-economica del "Servizio triennale (2019-2021) di pulizia degli arenili di libera fruizione del Comune di Alghero". Si noti come il Comune faccia uso del termine Pulizia, associando di fatto i resti di Posidonia oceanica alla necessità di PULIRE la spiaggia.

Figura 38. Immagine Anni '60 che mette in evidenza il limite Sud del sotto-tratto sabbioso B) (limite Nord del sotto-tratto A)), il cui aggetto roccioso determinava condizioni favorevoli ad un maggior stazionamento dei depositi sedimentari di Posidonia. http://www.lidodialghero.it/storia.html

Figura 39. Escavatore cingolato autorizzato impiegato in corrispondenza del Lido di Alghero.

Figura 40. Schema sinottico dell'assetto morfodinamico e morfologico UF Alghero. Tratti in deformazione strutturale (di lungo periodo). In Rosso arretramento storico (frecce rosse); in Verde progradazione (frecce verdi); in Giallo minore erosione della riva ma profilo fortemente depresso (Frecce gialle)- La dimensione delle frecce è proporzionale alla magnitudo del fenomeno. Le frecce blu indicano la dinamica da Libeccio che s'innesca per effetto della dei bassifondi de La Maddalenetta; A Nord occorre tenere conto dell'ondazione diretta. Da notare la corrente *longshore* antitetica con esiti circolari che si genera a valle delle scogliere al largo a protezione del Lido di San Giovanni in SUG1. Le croci indicano le aree di stoccaggio della gestione della P.o.

BIBLIOGRAFIA

De Falco G., Baroli M., Simeone S. & Piergallini G. (2007). *La Rimozione della Posidonia dalle spiagge: conseguenze sulla stabilità dei litorali*. Fondazione IMC - Centro Marino Internazionale, Oristano. 17 pp.

Manuale per la gestione sostenibile e il recupero dei residui spiaggiati di Posidonia (2013). Manuale e Linee Guida operative P.R.I.M.E. 62 pp. Eco-logica, Bari.

De Luca M., Chaiallah A., Andreucci S., Cossu G., Santonastaso A., Sechi D., Stelletti M., Pascucci V. (2020). *Seafloor Map of the Alghero Bay (Sardinia, Italy)*, Journal of Maps, 10.1080/17445647.2020.1805808, 16, 2, pag. 669-679.

De Santis N. (2000). *L'erosione marina lungo il litorale della rada di Alghero*. Tesi di Laurea inedita dell'Università di Sassari.

Ginesu S., Sias S., Orrù P. & De Santis N. (2001). *Dinamica recente ed attuale della Rada di Alghero (Sassari – Sardegna nord occidentale)*. Carta geomorfologica in scala 1:10.000. ZetaBeta Editrice srl. Verona.

Ginesu S., Sias S. & De Santis N. (2001). *La Rada di Alghero-Erosione e dinamica costiera*. Pubb. Istituto Sc. Geologico Mineralogiche Università di Sassari. Ed. La Celere. Alghero.

ISPRA (2010). *Formazione e gestione delle banquettes di Posidonia oceanica sugli arenili*. Manuali e Linee Guida, 55. pp.124.

Ginesu S. & Sias S. (2004). *Arretramento e indice di erosione lungo il litorale di Alghero*. Studi Costieri, vol. 8, p. 49-58.

Manca, E., Pascucci, V., Deluca, M., Cossu, A., & Andreucci, S. (2013). *Shoreline evolution related to coastal development of a managed beach in Alghero, Sardinia, Italy*. Ocean & Coastal Management, v. 85, pag. 65-76.

Mancinelli A., Aminti P.L., Archetti R., Atzeni A., Canu V., Cappietti L., Lorenzoni C. & Zanuttigh B. (2005). *Opere di difesa realizzate con strutture sommerse ed a cresta bassa ad Alghero (SS), Perd'e Sali (CA), Marina di Massa (MS), Marina di Pisa (PI), Porto Recanati (MC), Marina di Montemarciano (AN), Lido di Dante (RA) e Pellestrina (VE)*. Studi Costieri. Vol. 9, pag. 7-50.

Postacchini M., Lalli F.,Memmola F., Bruschi A., Bellafiore D., Lisi I., Zitti, & Brocchini M. (2019). *A model chain approach for coastal inundation: Application to the bay of Alghero*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 219 (2019) 56-70
https://www.sciencedirect.com/journal/estuarine-coastal-and-shelf-science

Tilocca G. (2010). *Il dissesto idrogeologico della rada di Alghero. Un esempio di insostenibilità del management costiero*, 8pp.
http://www.geologi.sardegna.it/it/notizie/archivio/archarticoli/article/2011/gebbaio/il-dissesto-idrogeologico-della-rada-di-alghero-1/?cHash=8b4fb052a5073a7f0604d3c3e1677565&sword_list%5B0%5D=alghero

Wootton L., Miller J., Miller C., Peek M., Williams A. & Rowe P. (2016). *New Jersey Sea Grant Consortium Dune Manual*, pp.76.

Panorama sul delta del Fiume Tevere: processi attuali ed evoluzione tardo quaternaria

Panorama on the Tiber River delta: present processes and Late Quaternary evolution

Paolo Tortora
Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Roma "La Sapienza"

E-mail: 3333313796@tim.it

Parole chiave: delta del Fiume Tevere, processi attuali, evoluzione tardo quaternaria
Key words: Tiber River delta, present processes, Late-Quaternary evolution

1. INTRODUZIONE

Tra i sistemi deposizionali della transizione terra-mare quello deltizio è senza dubbio il più complesso essendo regolato da variabili climatiche e contesti geomorfologici che sono propri di due aree fortemente diverse e interferenti: il bacino di drenaggio continentale e quello accettore costiero. La sua complessità si traduce in un'ampia gamma con cui questo sistema può organizzarsi assumendo nel bacino accettore espressioni morfologiche svariate e in ultimo dipendenti dalla forza costruttrice dell'input fluviale e da quelle del moto ondoso e della marea che invece provvedono a smistare il sedimento in arrivo (Galloway, 1975; Caldwell *et al.*, 2019; Kori e Saito, 2022). A scala globale, i delta a dominio ondoso sono i più frequenti (l'80% in un catalogo di 11,000 delta) sebbene gran parte dei megadelta sia a dominio fluviale e di marea (Nienhuis *et al.*, 2020). Qualsiasi sia la loro tipologia, gli apparati deltizi sono aree di attenzione per le risorse che includono e per i compiti dedicati alla loro gestione e preservazione (Kuenzer *et al.*, 2019; Passalacqua *et al.*, 2021). Ben 500 milioni di persone risiedono sui delta mondiali beneficiando di terreni alluvionali fertili, accesso all'acqua, trasporti su vie navigabili, ripari portuali, biodiversità della flora e fauna, e in alcuni casi presenza di gas, idrocarburi e sale, oltre a contenere spesso preziose testimonianze di civiltà passate.

Al contempo, le aree deltizie sono fortemente esposte a numerose minacce in quanto facilmente inondabili per la loro morfologia poco elevata, con effetti anche aggravati dall'attuale innalzamento del livello marino e dalla subsidenza naturale e/o indotta dall'estrazione di risorse dal sottosuolo. Inoltre sono mutevoli anche in tempi relativamente brevi essendo sede di ambienti intrinsecamente legati da delicati equilibri, spesso alterati da componenti antropiche (Syvitski *et al.*, 2009). Malgrado le loro fragilità, i delta mondiali hanno registrato negli ultimi 30 anni un guadagno netto di terra emersa (54 km^2/anno), che comunque ha principalmente riguardato i megadelta e che è stato spesso indotto da deforestazioni sui bacini di alimentazione (Nienhuis *et al.*, 2020). Tra i non pochi casi di perdita di terra emersa, si nota il numero assai elevato di apparati deltizi (un migliaio circa) il cui stato di erosione è ascritto a forte carenza di sedimento causata da sbarramenti e dighe costruiti lungo il reticolo idrografico fluviale. Come si vedrà, il delta del F. Tevere non è esente da numerosi degli aspetti fin qui segnalati.

La letteratura scientifica che lo riguarda è estremamente ricca e include anche antiche descrizioni di epoca romana dell'area nonché documenti e cartografie papali che abbracciano con discontinuità buona parte del secondo millennio. I primi lavori tecnici di un certo dettaglio vanno dalla metà del '700 fino agli inizi del secolo scorso, con argomenti che spaziano dalle opere di bonifica, al regime del F. Tevere e alle fasi di progradazione del delta (Chiesa e Gambarini, 1744; Ponzi, 1875; Amenduni, 1884; Bocci, 1892; D'Arrigo, 1932). È comunque con la realizzazione del Foglio Cerveteri della Carta Geologica d'Italia (Segre, 1967) che prendono avvio con vigore gli studi con tecniche moderne, i quali inizialmente riguardano le modalità di immissione delle acque dolci in mare, lo sversamento di inquinanti sul fondale e i lineamenti morfo-strutturali della piattaforma continentale (Giulianelli e Todisco, 1978; IRSA, 1980; Lechi e Todisco, 1980; Ghirlanda e Ronda, 1981; Bortoluzzi *et al.*, 1982; Fabbri *et al.*, 1984; Bellotti e Tortora, 1985; Marani *et al.*, 1986; Belfiore *et al.*, 1987; Trincardi e Normark, 1988), a cui si aggiungono le prime indagini sulla stratigrafia della piana deltizia (Belluomini *et al.*, 1986; Bellotti *et al.*, 1987a; 1987b;1989) e sulla dinamica evolutiva della fascia litorale (Caputo *et al.*, 1983; 1987; 1989). Studi di poco successivi si accentrano sul delta sottomarino con indagini mirate a chiarire i circuiti di dispersione del sedimento (Bellotti *et al.*, 1993; Tortora, 1995; Bellotti e Tortora 1996), i fenomeni di instabilità sul fondale di prodelta (Chiocci *et al.*, 1996) e il significato di alcune evidenze dell'ultimo *lowstand* sulla scarpata continentale (Chiocci e Normark, 1992), quest'ultime rivisitate anche più recentemente (Chiocci e Casalbore, 2011). In una fase più avanzata degli studi stratigrafici, Bellotti *et al.* (1995) ricostruiscono la successione tardo-quaternaria nel sottosuolo della piana deltizia, e Bellotti *et al.* (1994) e Chiocci e Milli (1995) la correlano con i dati sismici a mare fornendo per la prima volta un quadro stratigrafico-evolutivo dell'intero apparato deltizio. Tra i numerosi lavori degli anni a seguire (Giraudi, 2004; Bellotti *et al.*, 2007; Bersani e Moretti, 2008; Di Bella *et al.*, 2011; 2013; Milli *et al.*, 2013; 2016; Tarragoni *et al.*, 2014; Tentori *et al.*, 2018), un contributo importante spetta alle indagini geo-

archeologiche che spesso hanno messo in luce la vicendevole influenza tra ambienti deltizi e presenza umana, anche rivelando aspetti strettamente geologici prima sconosciuti (Arnoldus-Huyzendveld, 2005; Goiran *et al.*, 2010; 2014; Bellotti *et al.*, 2011; 2018; Giraudi, 2011; Mazzini *et al.*, 2011; Vittori *et al.*, 2015; Sadori *et al.*, 2016; Salomon *et al.*, 2017; 2018; 2020).

2. IL DELTA ATTUALE

2.1. Contesto a contorno

Il bacino idrografico del F. Tevere (circa 17,000 km^2), di complessa evoluzione tettonica (Doglioni *et al.*, 2004), è suddivisibile in due porzioni rispettivamente a monte e a valle della confluenza del F. Paglia (*Fig.* 1). Sulla prima porzione (6077 km^2) affiorano in prevalenza le torbiditi silicoclastiche oligo-mioceniche, mentre sulla seconda (5343 km^2), con un maggior numero di tributari, prevalgono i sedimenti marini a tessitura fine di età dall'Oligocene al Pliocene, le successioni carbonatiche dal Giurassico al Miocene, e le unità vulcaniche plio-pleistoceniche appartenenti ai centri eruttivi dei Vulsini, di Vico, dei Sabatini e dei Colli Albani (De Rita *et al.*, 2002; Peccerillo, 2005). Il F. Tevere ha una portata liquida media di 180 m^3/s che viene ripartita dai due distributori del tratto terminale nel rapporto di 5:1 a favore del canale principale di Fiumara Grande (Ghirlanda e Ronda, 1981). Quella solida media annua è poco al di sotto di 1 milioni di tonnellate ed entrambe variano secondo il semestre stagionale. Alcuni Autori (Bersani e Piotti, 1994; Bersani e Bencivenga, 2014; Bellotti, 2018) identificano valori di soglia della portata liquida che condizionano il trasporto solido, ritenuto trascurabile per portate inferiori a 350 m^3/s, significativo per portate tra 350 m^3/s e 700 m^3/s, e molto significativo per valori ancora più alti (dalle piene ordinarie a quelle eccezionali) che azionano il trasporto anche di frazioni sabbiose e ancora più grossolane. Essendo gli eventi con portate superiori a 350 m^3/s piuttosto rari (67 giorni nell'intervallo 1932-2010, e 17 giorni nel periodo 1987-2010; Bencivenga e Bersani, 2014), ne deriva che il delta è rifornito in modo significativo solo occasionalmente. Gli apporti alla foce comprendono sabbie, limi e argille con proporzioni tra loro mal definibili perché dipendenti da ogni evento singolo. Nel sedimento superficiale del bacino marino accettore (nell'area di *Fig.* 7), le loro proporzioni sono rispettivamente il 22%, 38% e 40% ma potrebbero mentire se riferite all'input fluviale in quanto i tassi di accumulo non sono uniformemente distribuiti nell'area marina.

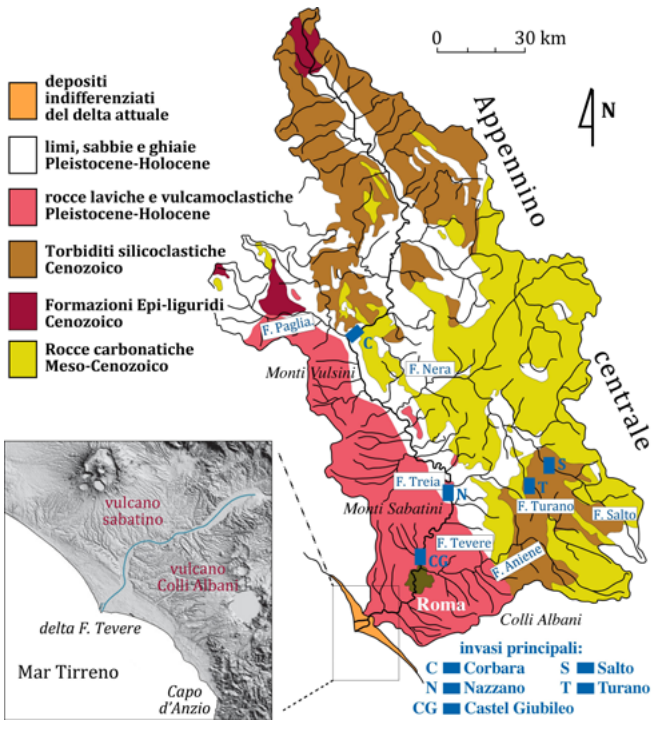


FIGURA 1. Bacino idrografico del Fiume Tevere e principali litologie affioranti (da Tentori *et al.*, 2018).

In condizione di piena, l'immissione del sedimento fluviale in mare avviene attraverso un flusso ipopicnico, o pennacchio torbido, consistente in uno strato di acqua dolce fluviale e sedimento fine che, in galleggiamento su quella marina, si rastrema in progressione verso il largo fino al suo esaurimento, talora molto netto (Giulianelli e Todisco, 1978). Alle foci del Tevere la drastica riduzione della velocità del flusso fluviale in uscita determina la deposizione immediata del carico sabbioso grossolano, con formazione di barre, a cui si aggiungono in subordine le argille flocculate al contatto tra acqua dolce e marina, effetto questo riscontrato anche lungo i due canali distributori a causa della risalita del cuneo salino (Bortoluzzi *et al.*, 1982; Mikhailova *et al.*, 1999). Gran parte dell'apporto fine (silt, argilla) è comunque incorporata nel flusso ipopicnico ed è dispersa seguendo il suo percorso.

Il clima d'onda (*Fig. 2*), desunto dai dati della boa di Civitavecchia per il periodo 2003-2014, indica che i mari da SO (17%), S (15%), OSO (11%), SSO (11%) e SSE (9%) sono i più ricorrenti. Le classi di altezza d'onda significativa (Hs) prevalenti sono 0.25-0.75 m (53%), 0.75-1.25 m (19%), < 0.25 m (14% = stato di calma), e 1.25-1.75 m (8 %). Onde nell'intervallo 1.75-3.25 m, non rare (6%), provengono da SO, OSO e subordinatamente da S e da SSE. Le onde superiori a 3.25 m sono quasi assenti (0.08 %), e quelle superiori a 4.25 m (0.01%) si riferiscono a picchi di tempesta, in genere di alcune ore, con periodo medio dell'onda tra 6.7 and 7.9 sec. Il massimo valore registrato di Hs è di 4.85 m. Per la vicinanza della boa di registrazione alla costa di Civitavecchia (circa 6 km), i mari da nord e dai settori di levante sono sottostimati per frequenza e valori di Hs rispetto alle misure attese in mare aperto. La statistica del periodo medio dell'onda, non riportata in figura, indica che le classi con frequenza maggiore - 3-4 sec (30%), 2-3 sec (21%), 4-5 sec (19%), 5-6 sec (11%) - in genere si associano con i mari da SSE e OSO e soprattutto con quelli da S e SO. I dati esposti indicano che le onde a maggiore impatto sulla costa provengono dal III quadrante, soprattutto da SO e S. La rifrazione del moto ondoso sui bassi fondali della conoide sommersa determina un trasporto di sabbia lungo riva che è divergente dall'apice e a cui si associa una circolazione per celle e correnti di ritorno (*rip-current*) forse indotte anche delle opere presenti (Caputo *et al.*, 1987).

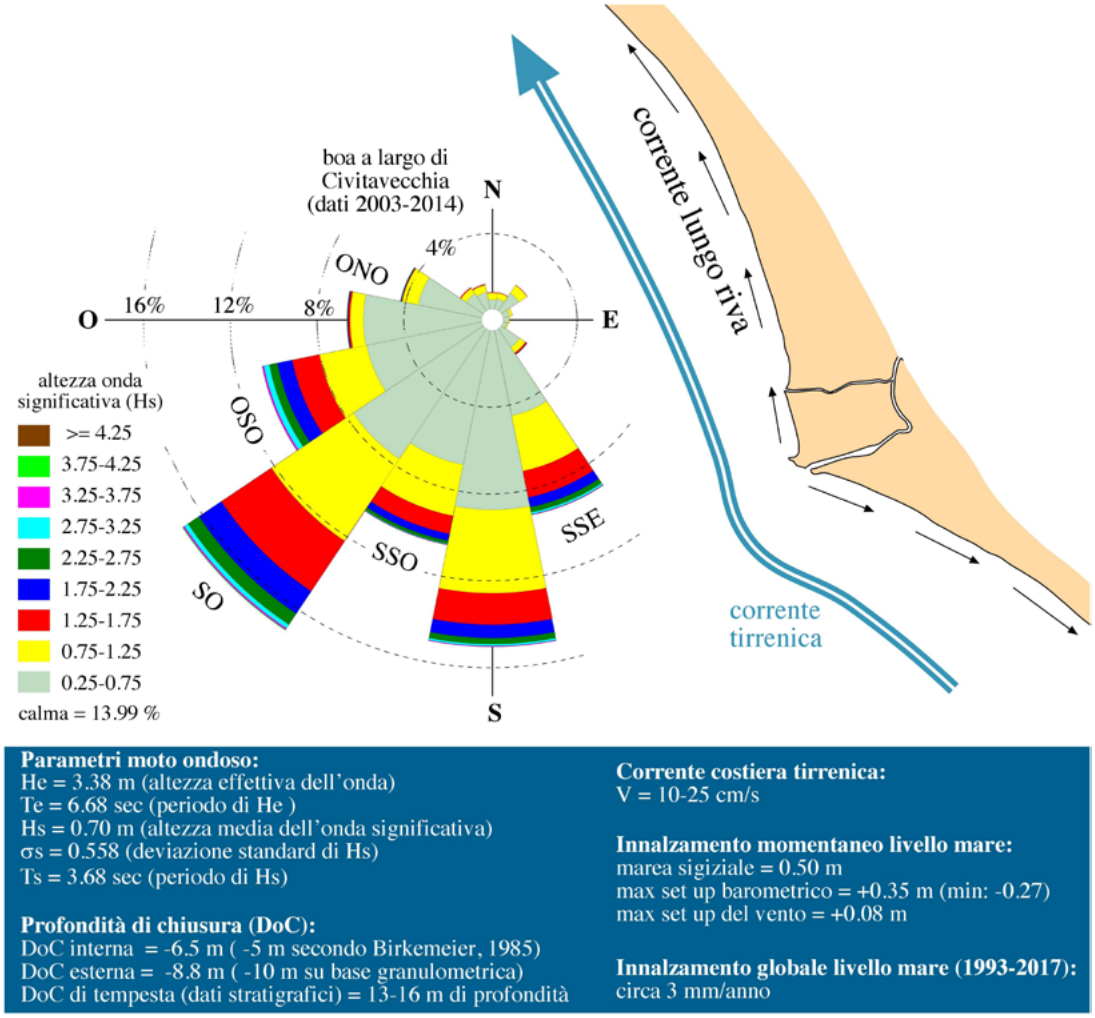


Figura 2. Clima d'onda e parametri idrodinamici. Il primo è desunto dall'elaborazione di dati ISPRA della Rete Ondamerica Nazionale. I parametri del moto ondoso elencati in basso sono quelli utilizzati per le stime della profondità di chiusura (DoC).

Alcuni parametri di tipo idraulico sono elencati in *Fig. 2*. La profondità di chiusura (DoC), calcolata dai dati del moto ondoso con le equazioni Hallermeier (1978; 1981), risulta a -6.5 m (a -5 m secondo l'equazione di Birkemeier, 1985) e a -8.8 m, rispettivamente per limite dello *shoreface* superiore e inferiore (DoC interna e esterna). Leggermente più profonda, a -10 m, risulta la DoC esterna stimata su profili granulometrici compositi (non mostrati) alla profondità ove drasticamente si riduce la componente sabbiosa. Le stratigrafie della piana deltizia esterna suggeriscono, a scala plurisecolare, un livello di base delle onde di tempesta sui 13-16 m di profondità. Misure correntometriche a largo del delta assegnano velocità comprese tra 10 e 25 cm/s alla corrente geostrofica diretta persistentemente verso nord lungo la costa tirrenica (IRSA, 1980; Lechi e Todisco, 1980; Istituto Idrografico della Marina, 1982). Dati contenuti in alcuni rapporti tecnici forniscono le escursioni momentanee del livello marino dovute a venti foranei, a fattori barometrici, e alla marea (*Fig. 2*). Osservazioni in loco durante eventi di tempesta descrivono flussi d'onda che invadono buona parte delle spiagge deltizie più fragili con *rup-up* dell'onda valutabile intorno alla quota di +1.5 m.

2.2. Zonazione del delta

Il delta del Tevere è un apparato a regime microtidale e di tipo arcuato-asimmetrico che si estende lungo costa per circa 35 km mentre il limite interno della piana corre all'incirca lungo l'isoipsa di 5 m, distante dall'apice 12 km. Il delta sottomarino, anch'esso asimmetrico, è esteso circa 11 km dalla costa estinguendosi su battenti d'acqua di 120 m, poco prima del ciglio della piattaforma continentale. Per superficie, la porzione sottomarina è circa tre volte (500 km^2) quella emersa (150 km^2). L'intero delta si compone di un'area emersa (piana deltizia interna ed esterna), una di transizione (zona litorale) e una esclusivamente sottomarina (fronte deltizio e prodelta) (*Fig.* 3).

La piana deltizia interna, morfologicamente piatta e con quote prossime e talora inferiori al livello mare, è costituita da sedimenti limoso-argillosi legati alle passate alluvioni del Tevere e agli ambienti palustri-lagunari (Stagno di Ponente e Stagno di Levante) esistenti prima della bonifica iniziata nel 1884, e ancor prima presenti come due ampie paleo-lagune. La piana esterna si differenzia dalla precedente per genesi, morfologia e sedimento, essendo costituita da numerosi allineamenti di cordoni dunali e di spiaggia (*beach-ridge*) della progradazione deltizia talora intervallati da modesti depositi palustri (Giraudi, 2004; Bersani e Moretti, 2008). La subsidenza dovuta alla compattazione è di basso grado sulla piana interna e trascurabile su quella esterna (Bellotti *et al.*, 2014).Tutta la piana deltizia ormai da tempo riceve un forte impatto antropico, dovuto all'espansione urbana delle città di Fiumicino e Ostia e di nu-

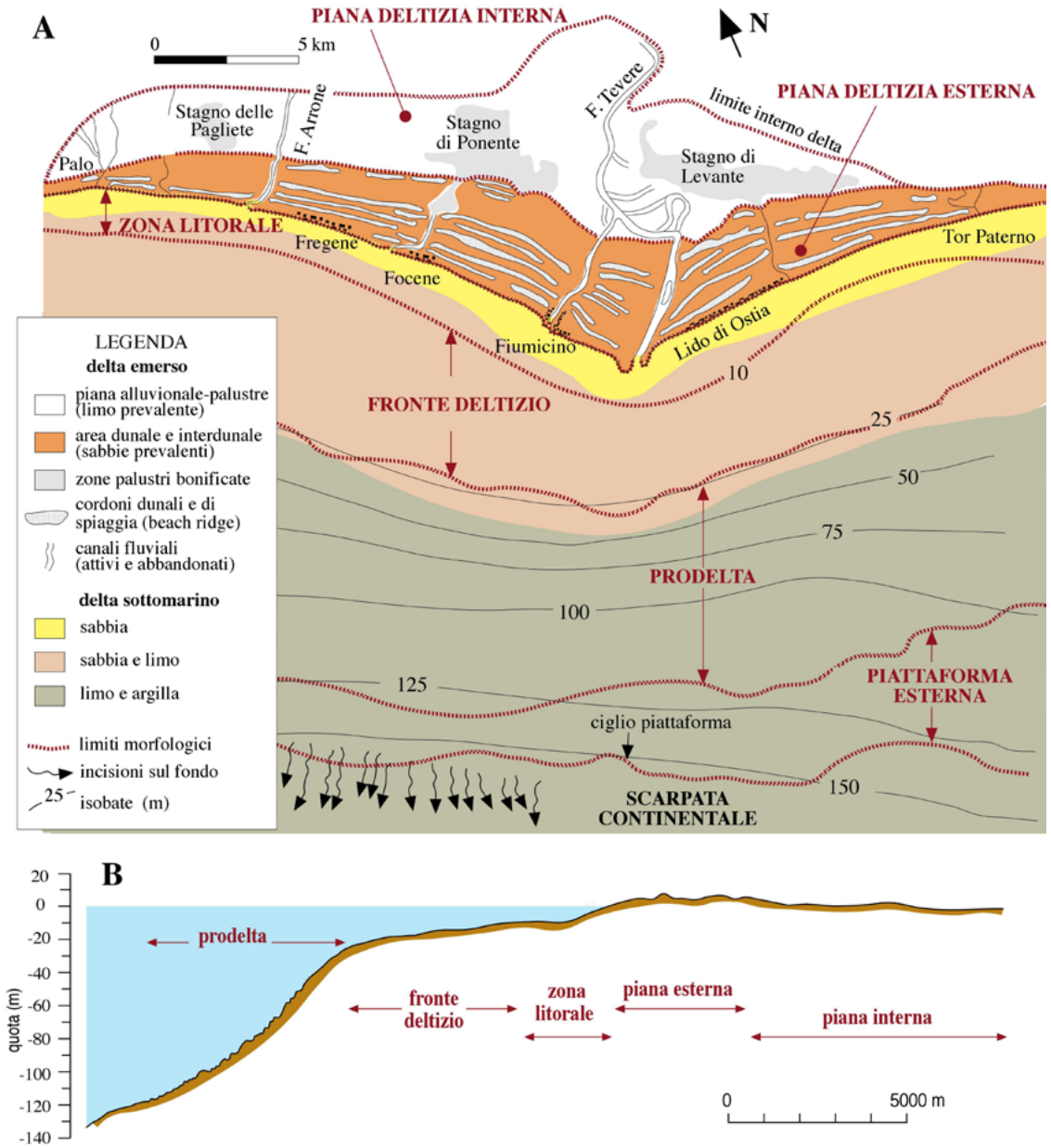


FIGURA 3. Zone morfo-dinamiche del delta nella loro estensione geografica (A) e secondo un profilo terra-mare (B).

merosi centri abitati minori nonché alle attività connesse con la balneazione, con l'aeroporto Internazionale Leonardo da Vinci e con i porti canali di Fiumicino e di Fiumara Grande. La piana, in parte destinata anche ad uso agricolo, è drenata da una fitta rete di canali artificiali che impedisce il riformarsi degli originari ambienti palustri, anche inibito dalla arginatura artificiale del Tevere che previene fenomeni di esondazione, se non quelli rari e modesti prossimi alla foce del distributore principale. Ad effetto del "carapace" urbano, gran parte della piana si trova oggi in uno stato di quiescenza morfo-deposizionale.

La fascia litorale - intesa come zona attiva includente i primi cordoni dunari (ove presenti), la spiaggia emersa e sottomarina - è costituita da sabbie di provenienza continentale, con prevalenza di granuli di quarzo, feldspati, calcite, pirosseni, anfiboli, magnetite, miche e frammenti litici carbonatici, arenacei e vulcanici (Belfiore *et al.*, 1987; Tentori *et al.*, 2018). I rari componenti locali consistono in frammenti bioclastici, di laterizi e occasionalmente di materiali ornamentali (graniti, porfidi, gabbri, marmi e gneiss) appartenenti ad edifici antichi. La zona litorale ha quasi ovunque confini interni innaturali, terminando spesso su lungomare viabili e strutture balneari che insieme all'urbanizzazione spinta fin sulla costa hanno cancellato il paesaggio dunale originario, con qualche rara eccezione tra cui si distingue per integrità l'area della Tenuta Presidenziale di Castelporziano. Numerose interferenze antropiche agiscono direttamente sulla dinamica lungo riva, come le foci armate del canale di Fiumicino e dei Pescatori, l'aggetto del Porto Turistico di Roma, e l'incompiuto Porto della Concordia al cui interno si accumulano ingenti quantità di sabbia che vengono sottratte al fabbisogno delle spiagge. A queste interferenze si aggiunge il susseguirsi quasi ininterrotto di strutture costruite in periodi diversi al fine di contrastare l'erosione lungo l'apice deltizio, tra Focene e poco a sud del Canale dei Pescatori. Così come oggi appaiono (*Fig.* 4), trattasi di opere: (i) longitudinali di tipo misto (emergente e soffolte) raccordate a terra da setti trasversali (spiaggia di Focene), (ii) obliquo-longitudinali formanti tomboli (spiaggia tra i due canali distributori),

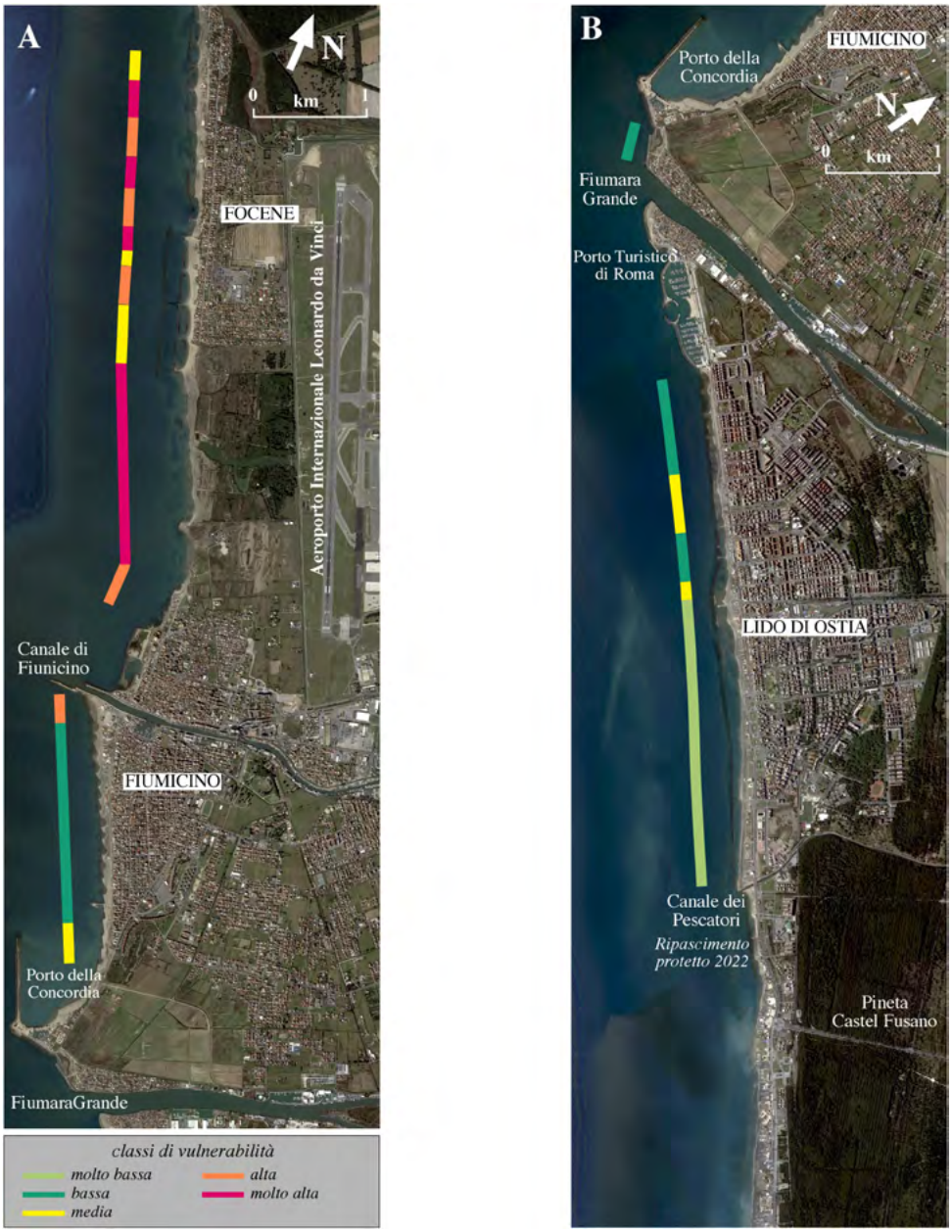


Figura 4. Lineamenti della zona apicale del delta (immagini Google Earth) nella sua porzione settentrionale (A) e meridionale (B) con classi di vulnerabilità effettiva della costa secondo Tarragoni *et al.* (2014).

(iii) aderenti a massi (alla foce di Fiumara Grande), e (iv) trasversali-diradate con barriera longitudinale continua di tipo soffolto (Ostia, zona ponente e centro).

L'erosione dei litorali deltizi si è manifestata blandamente fin dall'inizio del 1900 per poi acuirsi dal 1950-60 fino ad oggi. La zona colpita è stata quella apicale con arretramenti della linea di riva anche fino a 200-250 m, mentre le ali del delta hanno mostrato stabilità o moderato avanzamento godendo del sedimento eroso all'apice (Caputo *et al.*, 1987). È ormai accertato che questo riallineamento della costa sia connesso alla forte riduzione dell'apporto solido del F. Tevere. Dati sul trasporto solido medio annuo (stazione di misura di Roma) evidenziano infatti che esso è passato da 10.6 milioni di tonnellate medie annue (fine '800), a 7.5 MT/a (intervallo 1932-1946), a 4.2 MT/a (1949-63), a 1.4 MT/a (1964-73) e infine a meno di 1 MT/a dal 1990 in poi (Bersani e Piotti, 1994; Bencivenga e Bersani, 2014). Questo trend di decrescita si acuisce dopo la realizzazione (1949-63) di numerosi dighe e invasi fluviali che ancor oggi intrappolano ingenti quantità di sedimento (Tacconi *et al.*, 2020). Almeno in alcuni periodi, l'erosione che ne è derivata non sembra sincrona sulla costa e sul fondale, così come indicano confronti tra cartografie del 1883 e 1939 da cui risulta che, a fronte di sostanziale stabilità della linea di riva, le isobate di 5 e 10 m si sono rispettivamente spostate verso terra di ben 1 km e 3 km (Bellotti, 2018).

Dal 1990, la difesa della costa è stata affidata principalmente a numerosi interventi di ripascimento che hanno introdotto in totale circa 5 milioni di m^3 di sabbia (Ferrante *et al.*, 1992; Caputo *et al.*, 1993). Questi interventi, insieme alle opere rigide ad oggi presenti, hanno parzialmente stabilizzato la linea di riva ma su posizioni in genere prossime ai manufatti costieri pertanto esposti alle mareggiate più forti. Attualmente, la costa dell'apice presenta una vulnerabilità potenziale da elevata a molto elevata e una vulnerabilità effettiva (che tiene anche conto delle difese attuate) che è alta sulla parte settentrione dell'apice deltizio e relativamen-

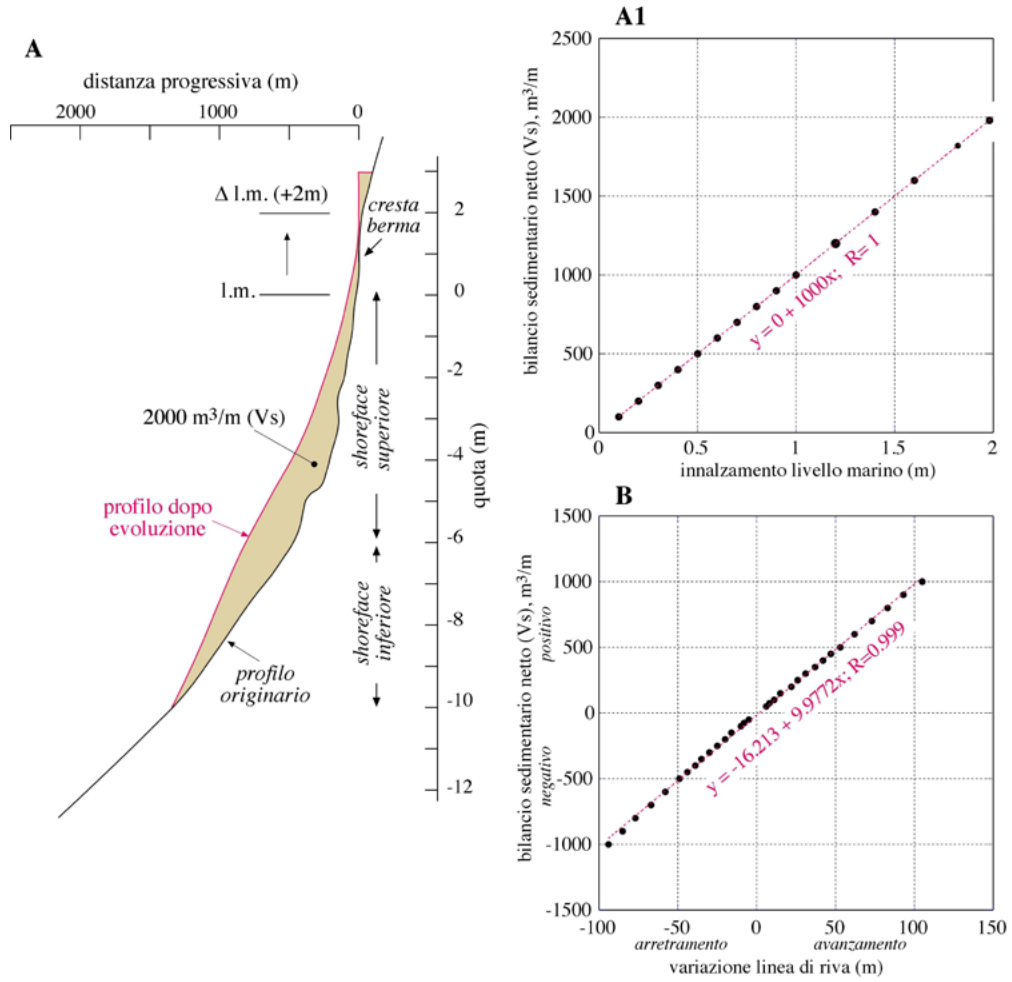


FIGURA 5. Simulazioni con il modello DRanSTM in modalità deterministica basate su un profilo composito estratto da dati DEM (Regione Lazio) e posto a rappresentare il litorale di Ostia (dal Porto di Roma verso sud-est per 7.5 km). In A, esempio di simulazione con evoluzione del profilo per un innalzamento del l.m. di 2 m, compensato da un input sedimentario (Vs=2000 m^3/m) che impedisce l'arretramento della linea di riva. In A1, volumi di compensazione (stabilità della riva) ottenuti ripetendo la simulazione per diversi innalzamenti del mare (Δl.m.), da cui si evince la relazione lineare tra Vs e Δl.m. (vedi testo). In B, risultati di ripetizioni della simulazione ma in condizione Δl.m.=0, mirate ad identificare la relazione tra Vs (positivo e negativo) e il risultante spostamento della linea di riva.

te bassa sulla zona di apice a sud del Canale di Fiumicino (*Fig. 4*), più protetta da opere e rifornita dai ripascimenti (Tarragoni *et al.*, 2014; Davoli e Tarragoni, 2019). Tra le criticità, va anche segnalata l'esportazione di sabbie litorali verso la piana e nel reticolo urbano ad opera del vento, e forse anche l'asporto involontario di sabbia da parte dei bagnanti visto il sovraffollamento estivo delle spiagge.

L'innalzamento del livello marino dovuto al riscaldamento globale e l'ulteriore peggioramento del bilancio sedimentario sembrano essere le incognite incombenti sull'evoluzione futura. A tal riguardo, alcune simulazioni eseguite con il *Dilating Random Shoreface Translation Model* (DRanSTM) (Cowell *et al.*, 2006; Figueiredo *et al.*, 2018) forniscono per il litorale di Ostia relazioni di tipo

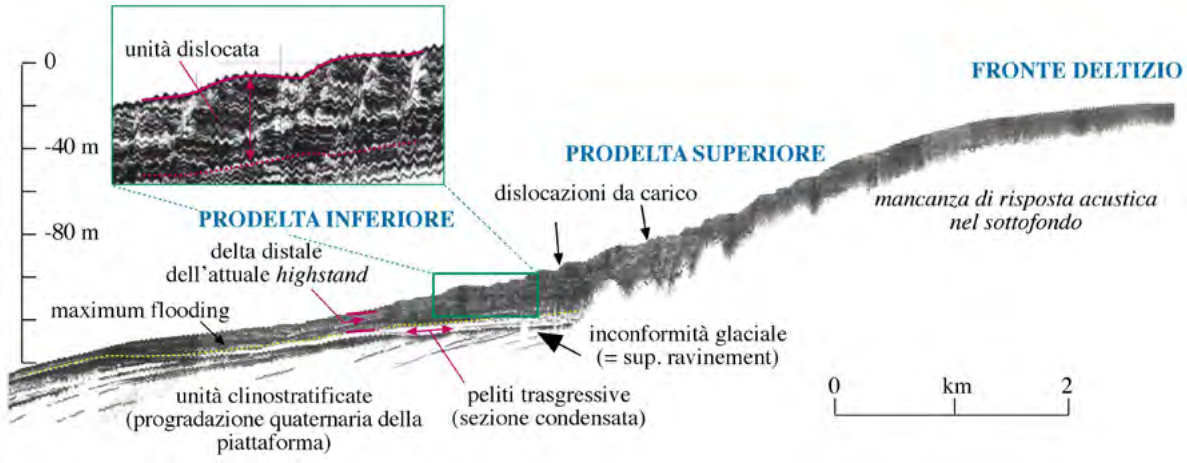


FIGURA 6. Linea sismica ad alta risoluzione lungo il delta sottomarino (localizzata in *Fig.* 12).

lineare tra stati di bilancio indotti (ripascimenti) ed effetti che ne derivano (*Fig. 5*). Tali relazioni indicano che 100 m^3/m di sabbia introdotti artificialmente (e al netto delle perdite): 1) compensano un innalzamento di 10 cm del livello marino stabilizzando la posizione della riva; 2) determinano, con livello mare stabile, un avanzamento di 10.5 m della linea di riva, che arretra in misura comparabile, 9.4 m, se il volume è messo in asporto.

Esternamente alla fascia litorale, il delta sottomarino è costituito da due zone ben distinte, il fronte deltizio e la scarpata di prodelta (*Figg. 3, 6*). Il primo, con estensione variabile (3.5-5 km), ha ovunque fondali piatti e a debolissima pendenza (0.17-0.24°) con assenza di benché minime forme canalizzate o di accumulo, presentando un ciglio esterno mal definito, intorno a -25 m e segnato da progressivo aumento di pendenza fino al prodelta. Quest'ultimo

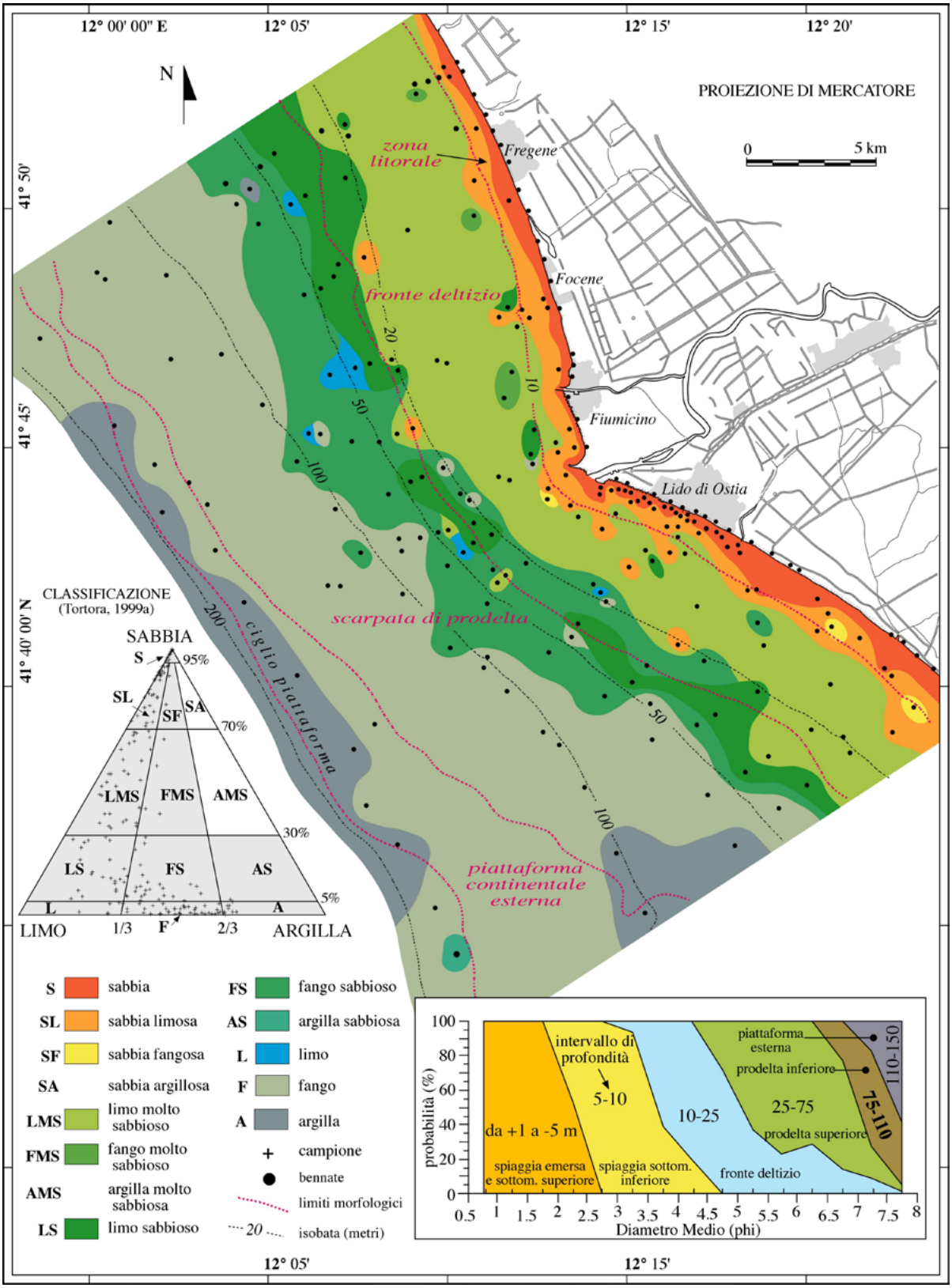


Figura 7. Distribuzione sul fondale dei tipi di sedimento riferiti ad una classificazione ternaria. In basso a destra, il grafico probabilistico relativo alla Dimensione Media (phi) del sedimento presente e atteso sulle varie zone del delta marino.

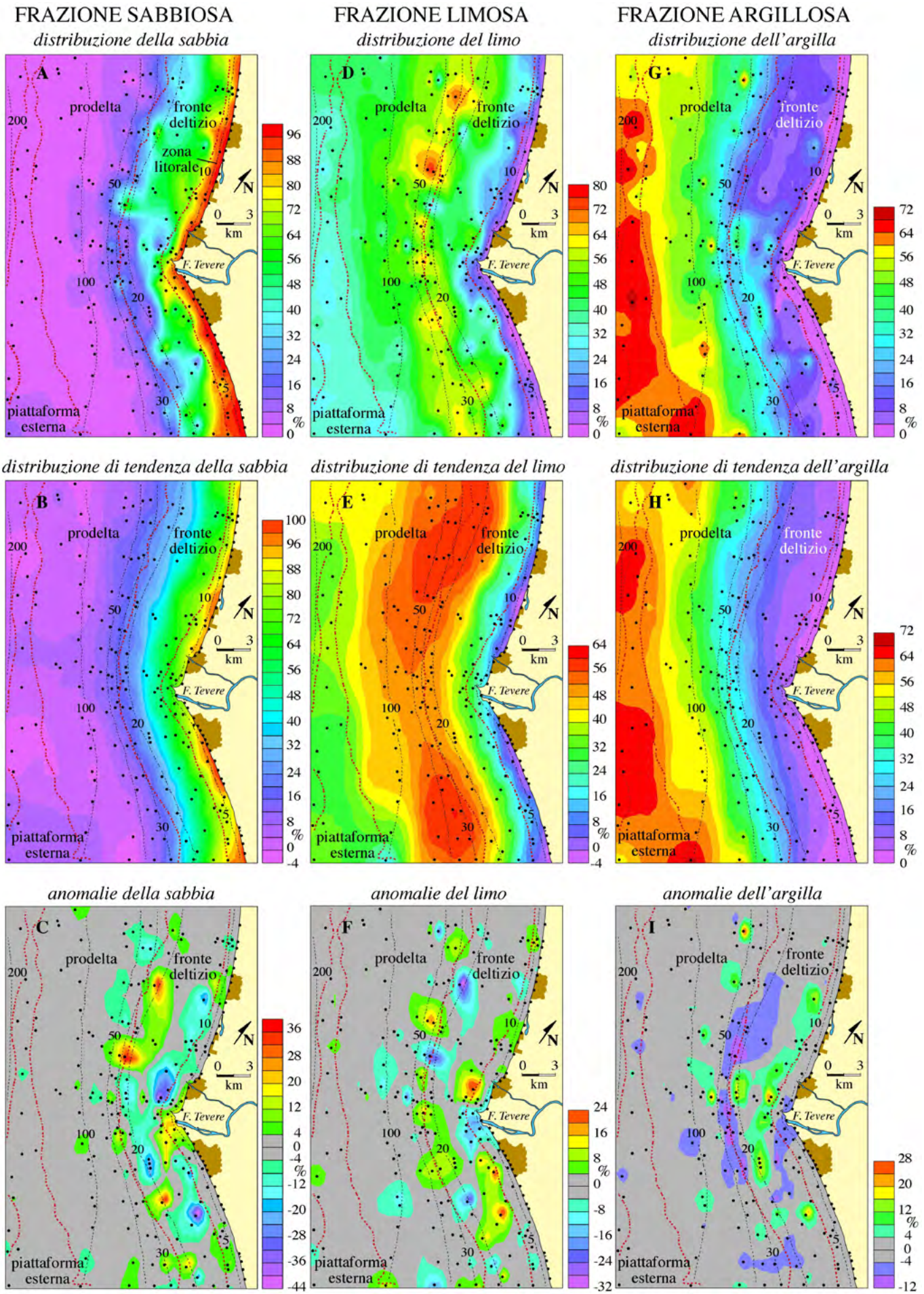


FIGURA 8. Applicazione della *Trend Surface Analysis* ai dati granulometrici della figura precedente. Per ciascuno dei tre componenti (sabbia, limo e argilla) è riportata la distribuzione dei loro valori originali (%) e di quelli che ne rappresentano la tendenza e le anomalie. Le superfici di interpolazione utilizzate sono del 5° (carta E) e 6° (B e H) ordine polinomiale.

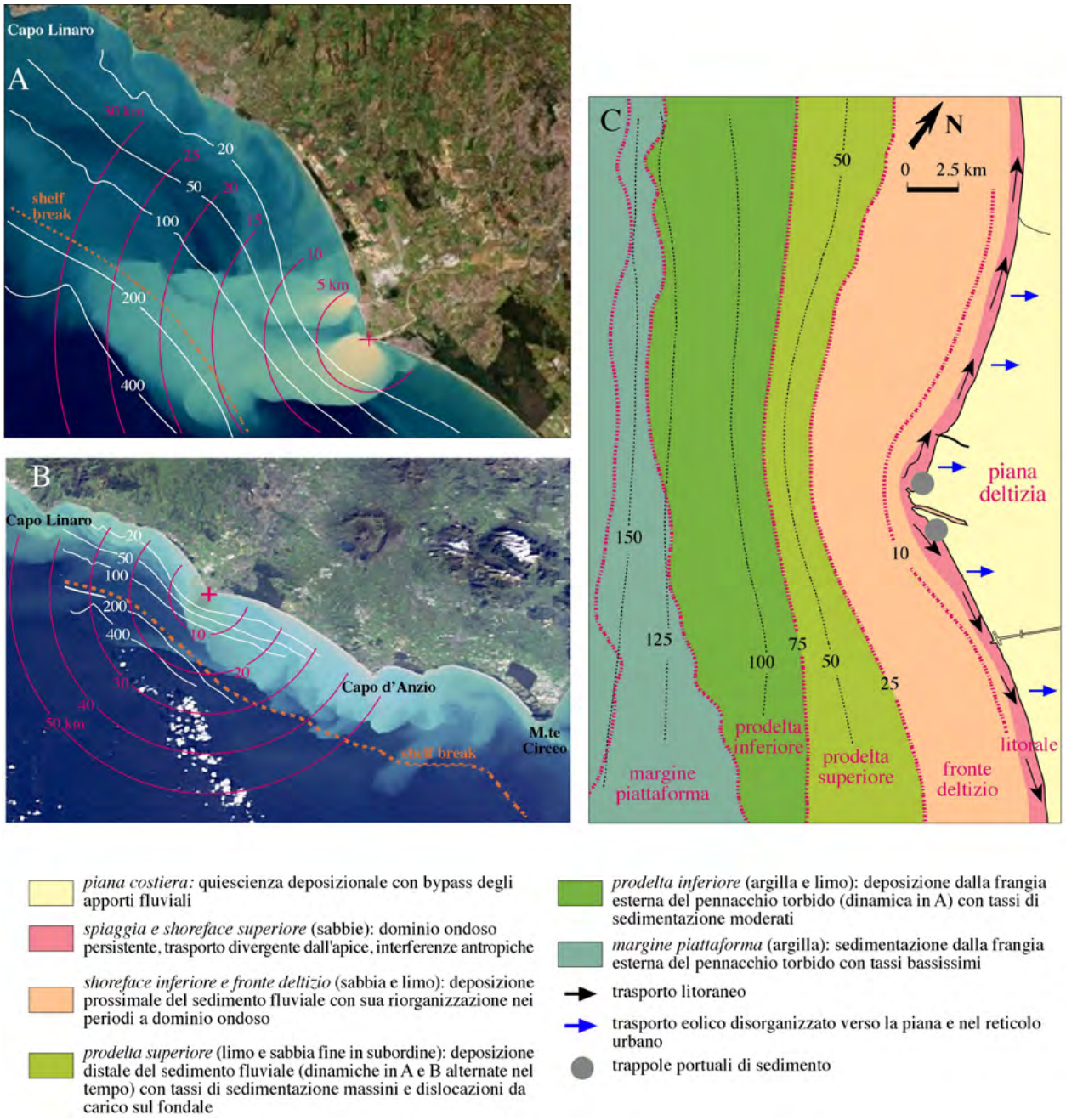


Figura 9. Dispersione in mare del sedimento fluviale secondo due modalità opposte (*end-members*): in A, in condizione di calma marina con notevole espansione verso il largo del flusso ipopicnico; in B, con mare mosso e distruzione del flusso (in rosso le distanze dall'apice e in bianco le isobate). In C, caratteristiche delle zone che compongono il delta.

si distingue in una porzione superiore e una inferiore. La prima ha un profilo leggermente convesso per i tassi di accumulo maggiori che altrove e si estende con pendenze di 1-1.3° fino a -75 m includendo una vasta area (di circa 125 km^2) deflessa verso nord-ovest e con deformazioni da carico. Queste interessano fino a 20 m di spessore del deposito e si esprimono sul fondale con morfologie a gradoni sbalzati di 3-5 m (*Fig. 6*).

La porzione inferiore del prodelta, invece, si raccorda attraverso pendenze progressivamente più deboli con la zona di margine della piattaforma continentale, ove la conoide deltizia è geometricamente assente e rimpiazzata da un mantello poco spesso di sedimento attuale e sub-attuale. Il fondale del margine continentale è interrotto da numerose incisioni (*Fig. 3*) che saranno oggetto di osservazioni specifiche più avanti.

2.3. Sedimento sul fondale marino

La distribuzione del sedimento superficiale sul bacino ricevente è qui presentata attraverso una prima carta di tipo descrittivo (*Fig. 7*) e poi una serie di restituzioni con finalità più speculative (*Fig. 8*). Tutte le riproduzione si basano su uno stesso *set* di campioni raccolti in periodi diversi e su analisi granulometriche ad alta risoluzione (intervalli a 1/4 di phi). La carta in *Fig. 7*, che utilizza come discriminante una classificazione a tre componenti (Tortora, 1999a), mette in luce un modello gradato di distribuzione del sedimento, con tessiture progressivamente più fini procedendo verso il largo. Tale modello, tipico di una sedimentazione a marcata alloctonia, è il risultato di una generale diminuzione dell'energia idraulica dalla costa verso il largo nonché di processi selettivi dovuti al trasporto del sedimento e al suo lavaggio da parte del moto ondoso. I sedimenti ad esclusiva

e forte componente sabbiosa (*sabbie* e *sabbie limose*) sono confinati entro la zona litorale. Più a largo, sul fronte deltizio, il *limo molto sabbioso* risulta dominante, mentre sul prodelta superiore, su quello inferiore e sul margine della piattaforma prevalgono rispettivamente il *fango sabbioso*, il *fango* e l'*argilla*. Come sintesi, il grafico in *Fig. 7* (in basso a destra) identifica in termini probabilistici la Dimensione Media (Folk e Ward, 1957) del sedimento presente ed atteso nelle varie zone del delta marino.

Le riproduzioni in *Fig. 8* riportano la distribuzione dei valori percentuali di ciascuno dei tre componenti (sabbia, limo, argilla) utilizzati per la carta precedente, nonché i valori (%) di tendenza e residui (anomalie) che compongono ciascuna distribuzione originaria, così come risultano separati dalla tecnica della *Trend Surface Analysis* (Tortora, 1999b). I tre componenti (*Fig. 8,* A, D, G) presentano tutti circuiti piuttosto irregolari tra la costa e poco oltre il fronte deltizio e distribuzioni di tendenza (*Fig. 8,* B, E, H) che ben evidenziano le zone di deposizione preferenziale: per la sabbia, la fascia litorale (*carta* B); per il limo, il fronte deltizio e il prodelta superiore (E); per l'argilla, il prodelta inferiore e il margine della piattaforma (H). L'interruzione dei valori massimi del limo (E), e il vicendevole aumento dell'argilla (G), traccia verosimilmente il percorso più ricorrente delle alluvioni del Tevere in mare. La presenza di sabbia (8-20%) sul prodelta superiore (B) è riconducibile all'espulsione di sedimento dal fronte ad opera del moto ondoso. Tutte le restituzioni dei valori residui (*Fig. 8,* C, F, I) identificano anomalie (positive e negative) di rango significativo poste quasi esclusivamente tra la costa e poco oltre il ciglio esterno del fronte deltizio. Dall'esame dei dati di campionatura emerge che esse sono principalmente legate al periodo di prelievo dei campioni, e che quindi si collocano in un contesto di continuo rinnovo del sedimento dovuto all'alternasi tra fasi di piena fluviale e periodi più prolungati a dominio ondoso (Bellotti *et al.*, 1993). Sul fondale più profondo, invece, l'assenza di anomalie di rilievo indica una deposizione che per tipi di sedimento è molto regolare nel tempo.

2.4. Dinamica generale del sedimento

Il delta si caratterizza per una scarsa attività morfo-deposizionale sulla piana, contrariamente a quanto accade sul bacino marino ricevente che comunque viene alimentato solo nelle rare fasi di significativo apporto solido fluviale. La dispersione in mare del sedimento fluviale segue due modalità principali che si verificano a seconda delle condizioni meteomarine del momento. La prima modalità, ad influenza fluviale, avviene in condizioni di mare calmo o poco mosso quando, sulla spinta inerziale della corrente fluviale, il flusso ipopicnico e la torbida inclusa si espandono notevolmente verso il largo depositando sul prodelta sedimento selezionato durante il trasporto (*Fig. 9A*). La dinamica è quindi di trasferimento del carico alluvionale a largo con sorpasso del fronte deltizio. La seconda modalità, ad influenza ondosa, si verifica invece con mare mosso fino al punto da distruggere già alla foce la stratificazione acqua dolce-marina del flusso ipopicnico, con torbida poi diretta dal moto ondoso secondo la sua direzione di provenienza (*Fig. 9B*). In questo caso l'alluvione viene diluita su tutte le zone del delta e anche oltre i confini laterali dello stesso. Entrambe le modalità rilasciano sedimenti alluvionali (dalla sabbia all'argilla) sul fronte deltizio i quali, nei successivi periodi di scarsa attività del fiume, sono ridistribuiti dal moto ondoso parte sulla fascia litorale (le sabbie) e parte sul prodelta (peliti e sabbie molto fini). In merito ai due tipi di dispersione, i sedimenti della zona litorale, del fronte e del prodelta si distinguono per ricevere rispettivamente influenza ondosa, mista e fluviale (*Fig. 9C*). I due tipi di dispersione vanno intesi come *end-members* di attesi casi intermedi ad ibridità variabile.

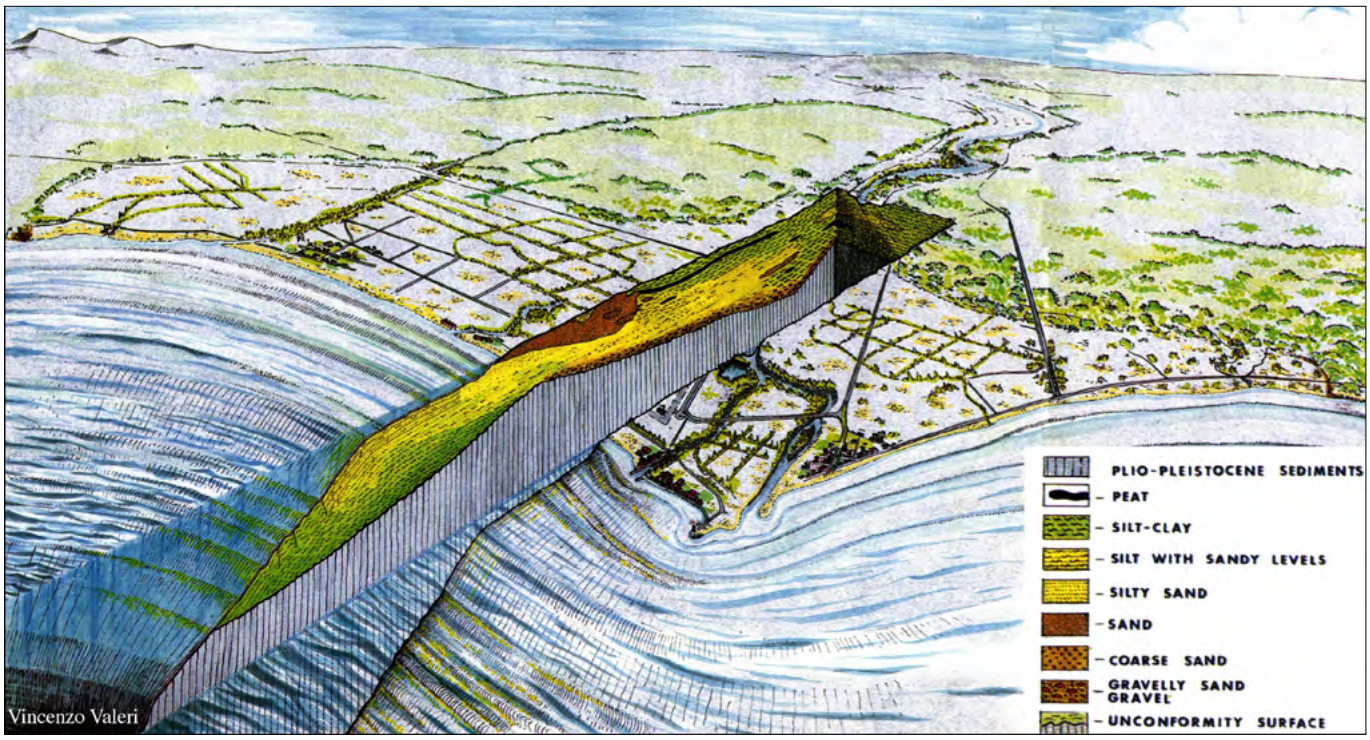


FIGURA 10. Illustrazione in acquarello (di Vincenzo Valeri) del delta del F. Tevere con spaccato stratigrafico elementare (da Bellotti *et al.*, 1989).

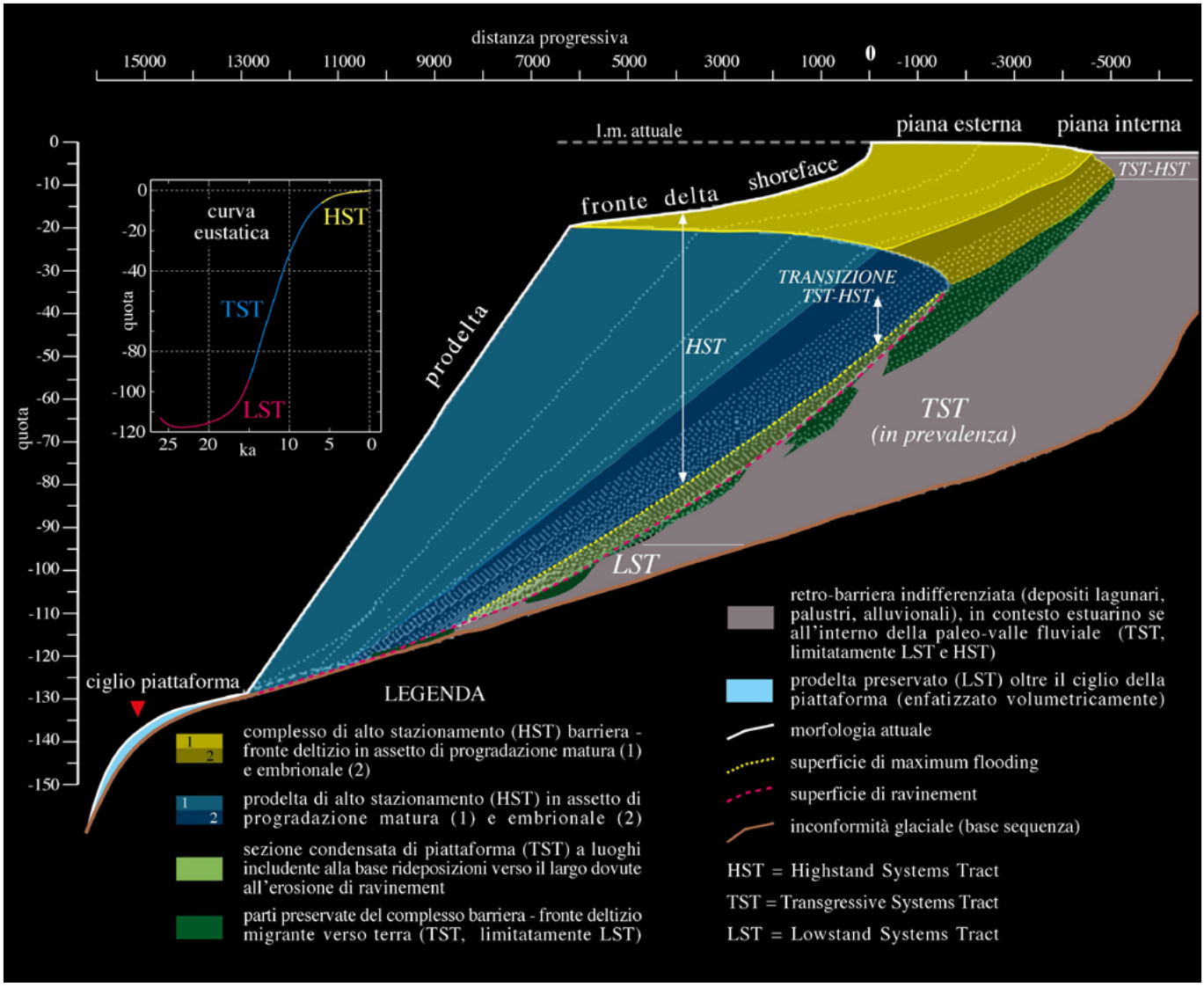


Figura 11. Stratigrafica semplificata del delta ottenuta attraverso il modello STM. La sezione è ortogonale alla costa e percorre nella sua metà di destra la paleovalle del Tevere.

3. IL DELTA DEL TARDO QUATERNARIO

Il delta del Tevere è un potente deposito che in termini di stratigrafia sequenziale è ascrivibile ad una sequenza deposizionale di quinto ordine ancora in evoluzione la quale include tre membri, o *systems tract*, riferiti rispettivamente all'ultimo basso stazionamento del l.m. (*lowstand systems tract*: LST), al successivo innalzamento (*transgressive systems tract*: TST) e al presente alto stazionamento (*highstand systems tract*: HST) (*Figg. 10, 11*). Tale sequenza giace su una superficie di inconformità che deriva principalmente da esposizione subaerea, e che nella sua espressione morfologica rappresenta la forma originaria del bacino accettore del delta, ove spicca la paleovalle del fiume spostata a nord di 7 km rispetto al tratto terminale del distributore attuale di Fiumara Grande (*Fig. 12*).

3.1. Periodo di basso stazionamento del livello marino (LST)

3.1.1. Evidenze

Le evidenze di questo periodo sono presenti sulla scarpata continentale superiore, sulla piattaforma esterna e nel sottosuolo della piana deltizia. Sulla prima zona esse consistono in 15 incisioni (*gully*) che, con testate poste lungo il ciglio della piattaforma, terminano a circa -450 m confluendo alcune di loro in un canale più ampio di direzione obliqua al declivio del fondale e di probabile genesi tettonica *(Fig. 13A*). Tali incisioni, assenti lungo tutto il margine laziale, sono connesse a flussi iperpicnici in fase di piena fluviale, i quali determinavano erosione e deposizione all'interno dei canali con tracimazione di sedimento e sovra-aggradazione delle zone di argine e intercanale (Chiocci e Normak, 1992). Queste morfologie, oggi inattive, localizzano la foce di *lowstand* del Tevere sulla attuale piattaforma esterna e il suo corso terminale lungo la direttrice che approssimativamente le ricongiunge alla paleovalle del fiume, sebbene alcuni Autori propongano un quadro paleoambientale differente (Milli *et al.*, 2016; Tentori *et al.*, 2018). Un carotaggio a gravità (di 3.5 m) proveniente dal *thalweg* di una *gully* indica che il sedimento, essenzialmente fangoso, è riconducibile nella porzione media e bassa del carotaggio (2 m circa) al *lowstand* e alla fase di caduta del l.m. che l'anticipa di poco (Di Bella *et al.*, 2013). Allineamenti di *gully* più antiche interessano ritmicamente i clinoformi della progradazione quaternaria del margine (*Fig. 13B*), testimoniando alternanze nel tempo dei fenomeni descritti, regolate dal grado di vicinanza della sorgente fluviale e/o di abbondanza di sedimento da essa (Chiocci e Casalbore, 2011).

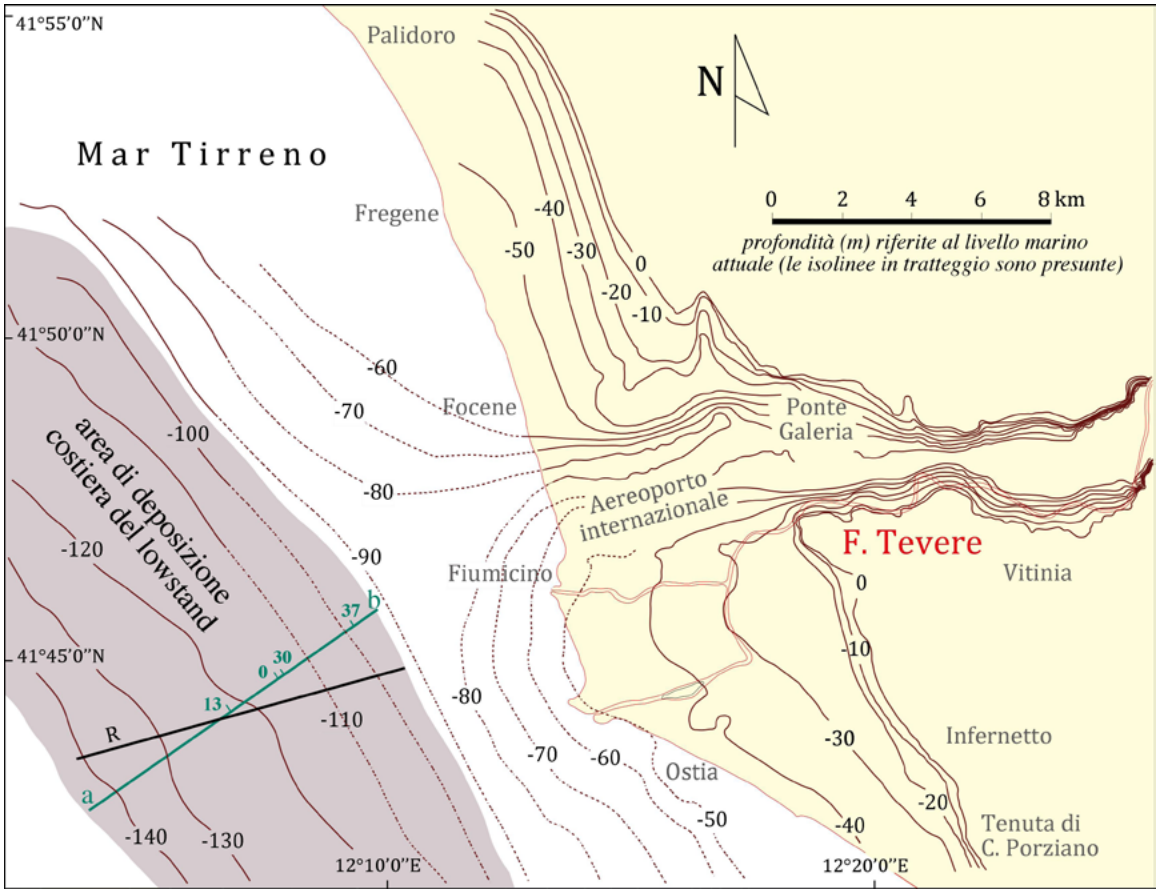


FIGURA 12. Morfologia della superficie di inconformità alla base del deposito deltizio con quote riferite al livello marino attuale e desunte da dati sismici a mare e sondaggi a terra (da Bellotti *et al*., 1994; Milli *et al*., 2013). La traccia R si riferisce alla linea sismica di *Fig.* 6, e quella a-b al profilo della simulazione in *Fig.* 14 (i cui passi fondamentali sono posizionati in a-b). L'area della deposizione costiera di *lowstand* è desunta dalla citata simulazione.

Sulla piattaforma esterna le evidenze del *lowstand*, come su quasi tutto il margine laziale, sono principalmente di tipo erosivo e riconducibili ad un sistema costiero che migra verso terra durante la fase terminale di questo periodo, lasciando sporadiche tracce deposizionali consistenti in un *lag* trasgressivo molto discontinuo e di spessore decimetrico. L'inconformità glaciale qui appare ringiovanita dalla superficie di *ravinement* che registra la traiettoria dell'avvenuta migrazione (*Fig. 6*). La debolissima pendenza della *ravinement* (0.2°) e l'assenza di rideposizioni verso mare depone per una migrazione *rollover*, attraverso cui la fascia litorale è continuamente demolita e ricostruita più all'interno grazie al recupero del materiale prima eroso. L'assenza di preservazione indica un *rollover* di tipo erosivo promosso da condizioni di bilancio sedimentario negativo sulla costa (Tortora *et al.*, 2009a). La superficie di *ravinement* presenta quote minime sui -130 m (*Fig. 6*), quindi in accordo con il livello-mare più basso del *lowstand* (-120 m) tenendo conto che essa è tracciata (nel *rollover*) al livello di base del moto ondoso (Cowell e Kinsela, 2018). Quadri paleoambientali incerti si associano comunque al *lowstand*. I lineamenti concretamente ipotizzabili sono un paesaggio costiero a debole gradiente, molto mobile al variare del l.m., dominato dal moto ondoso, altamente rifornito in sedimento fluviale, ma anche con perdite significative di sabbia dovute al trasporto su lunghe distanze, forse di centinaia di chilometri vista l'assenza di ostacoli morfologici (paleo-promontori) su tutta la piattaforma esterna del Lazio (e oltre). Nel sottosuolo della piana deltizia, le evidenze di questo periodo consistono in depositi a tessitura variabile, dalla ghiaia all'argilla, di canali fluviali e piana alluvionale che poggiano direttamente sull'inconformità della paleovalle del Tevere.

3.1.2. Cinematica evolutiva

Uno degli scenari accreditati per il *lowstand* è stato valutato utilizzando lo *Shoreface Translation Model* (SMT) che, attraverso opportuni parametri ambientali in ingresso, restituisce in uscita dati numerici e schemi 2D della cinematica evolutiva costiera secondo passi temporali discreti, nello specifico di 300 anni (Cowell *et al.*, 1992; 1995; 2003a; 2003b). L'applicazione del modello è stata orientata da considerazioni contenute in studi precedenti (principalmente in Bellotti *et al.*, 1994), inoltre modulando i parametri di ingresso in modo da riprodurre le evidenze geologiche disponibili (i.e. il metodo inverso: Tarantola, 1987) ed estendendo la ricostruzione evolutiva anche al periodo trasgressivo (non mostrata) con conforto delle stratigrafie disponibili sul delta emerso. Lo scenario di *lowstand* è presentato in *Fig. 14* come distinto in tre fasi successive che fanno riferimento alla curva eustatica in Peltier e Fairbanks (2006).

La prima fase (*Fig. 14A*) è di caduta seguita da stabilità del l. m., abbraccia un periodo di 3.9 ka, ed è stata riprodotta introducendo nella sezione ingenti quantità di sedimento (in totale, +19290 m^3/m). La regressione forzata iniziale e la successiva progradazione accrescono l'intero complesso costiero (*strandplain*, *shoreface*, fronte delta, prodelta) de-

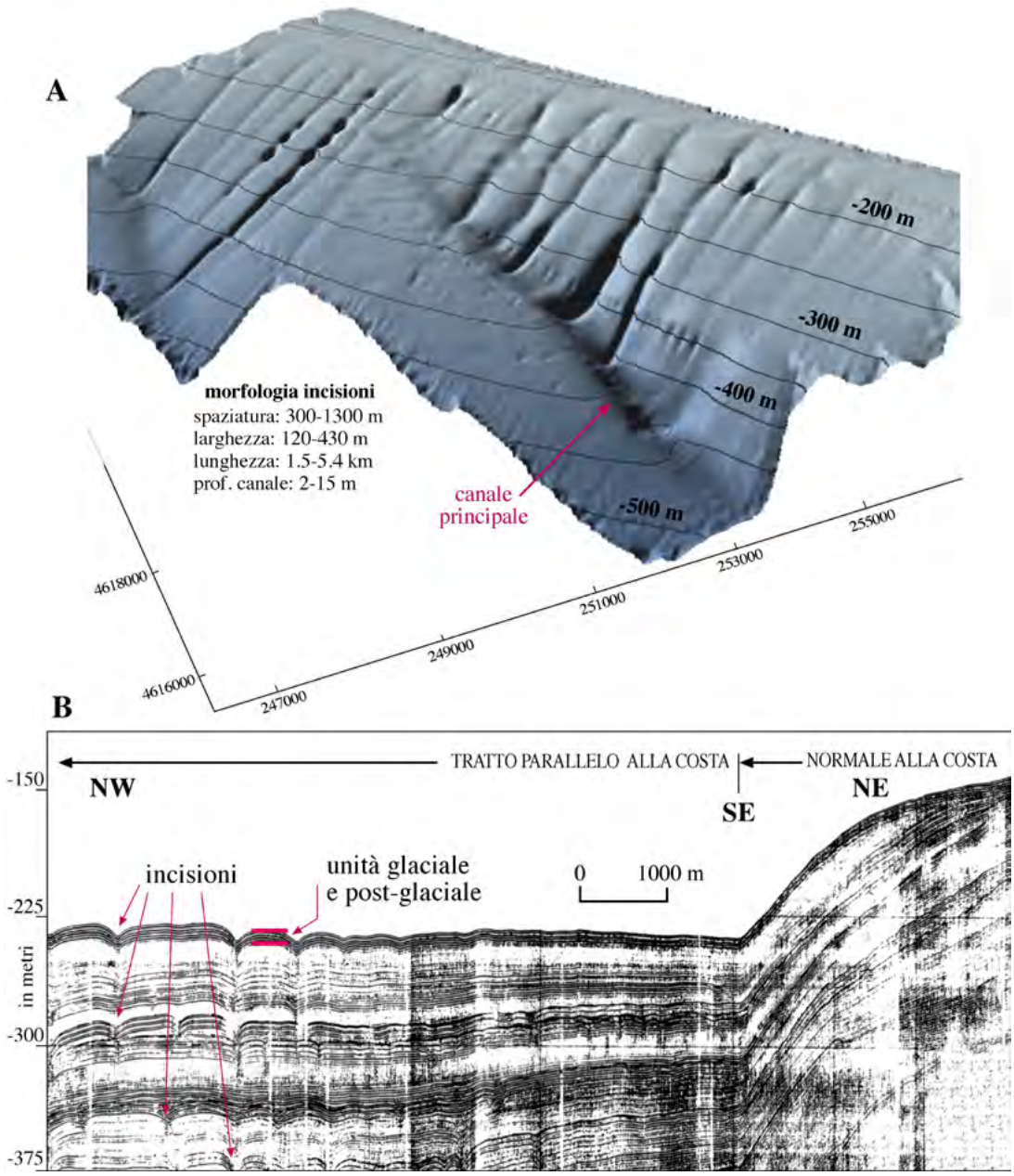


Figura 13. Incisioni sulla scarpata continentale superiore antistante al delta del F. Tevere (localizzate in *Fig.* 3). In A ricostruzione del fondale da dati multibeam, e in B profilo sismico ad alta risoluzione secondo un percorso prima ortogonale e poi parallelo alla costa (da Chiocci e Normark, 1992; Chiocci e Casalbore, 2011).

terminando un avanzamento rilevante della costa (1670 m), apprezzabile nel contesto geografico in *Fig. 12* (vedi passi 0-13 lungo la traccia a-b). Nell'ambito dello scenario descritto, aspetti incerti riguardano il grado di accrescimento del complesso costiero, non verificabile con dati geologici.

La seconda fase (*Fig. 14B*), in condizioni di moderato innalzamento del l.m. (+8.5 m in 5.1 ka), ha sperimentalmente previsto detrazioni di sedimento (in totale -12450 m^3/m) mirate a riprodurre le evidenze reali disponibili. L'evoluzione si caratterizza per la migrazione verso terra del sistema costiero, con arretramento significativo della costa (circa 1890 m) accompagnato dallo smantellamento quasi completo del prodelta prima formato. La migrazione è proposta dal modello come un *rollover* erosivo che intacca debolmente l'inconformità ringiovanendola nella superficie di *ravinement*. La deposizione lagunare e/o alluvionale (il modello non discrimina i depositi di retrobarriera) è stata imposta ritenendo che un sistema barriera-laguna, persistente durante la successiva trasgressione, fosse già presente al termine di questa seconda fase.

La terza fase (*Fig. 14C*), regolata da tassi medio-alti di innalzamento del l.m. (+15 m in 2.1 ka), è stata fatta evolvere, in assenza di dati geologici di controllo, come continuazione logica della fase precedente e con orientamenti che in prospettiva hanno considerato le stratigrafie del delta emerso (Bellotti *et al.*, 1995; Tentori *et al.*, 2018). Il processo evolutivo vede la migrazione della barriera (2365 m) sul tetto dei depositi lagunari progressivamente messi in posto, quindi con l'abbandono del piano traslativo dell'inconformità. Tale migrazione avviene con una modalità che è intermedia tra il *rollover* e l'*encroachment* (quest'ultimo fedele al *Bruun role*; Bruun, 1962) e che dipende dall'incremento di pendenza del piano traslativo (Tortora *et al.*, 2009a). Il prodotto stratigrafico consiste in depositi preservati di barriera e retrobarriera, separati dalla superficie *ravinement* dai sovrastanti sedimenti ridesposti verso il lar-

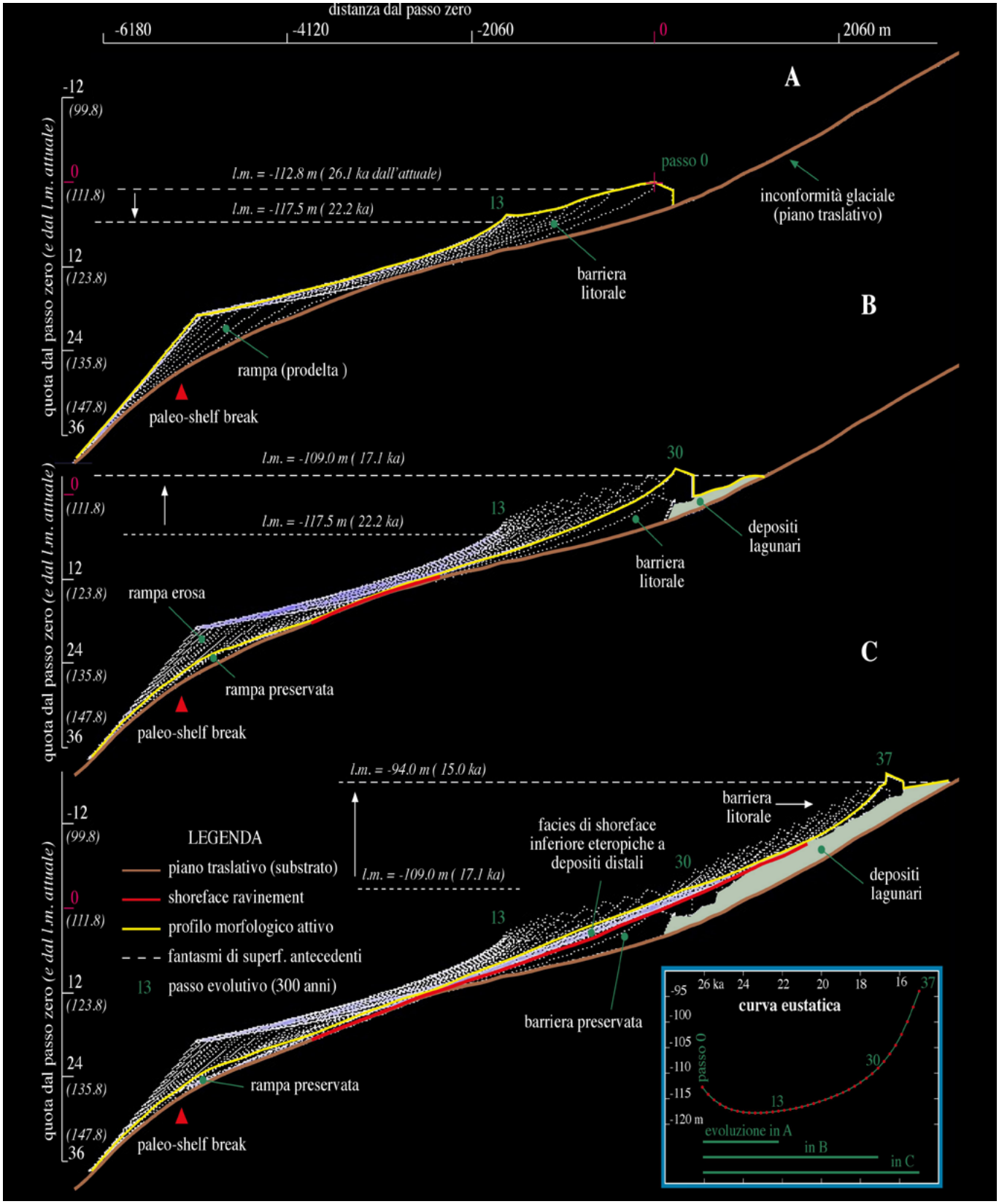


FIGURA 14. Ricostruzione cinematica (modello STM) dell'evoluzione costiera durante il *lowstand*, distinta in figura secondo tre fasi successive (l'ultima include le precedenti): caduta e quasi stabilità del livello marino (in A), suo innalzamento moderato (B) e poi più deciso (C); la sezione è ubicata in *Fig.* 12. In basso a destra, la curva eustatica da cui sono stati estratti i dati per la simulazione.

go durante la migrazione (facies di *shoreface* inferiore) che passano in eteropia laterale a facies distali di piattaforma. Si noti (i) la preservazione di una voluminosa porzione della barriera là dove aumenta la pendenza dell'inconformità, contesto noto in letteratura come favorevole alla preservazione (Tortora *et al.*, 2009b), (ii) la scarsa volumetria della barriera migrante a causa dei sedimenti abbandonati sul fondale per preservazione e rideposizione esterna, e (iii) l'emersione sui bassi fondali di depositi di retrobarriera. Questa fase si conclude (passo 37) con una paleocosta posizionabile in *Fig. 12* lungo l'isolinea di -100 m. Nella stessa figura è riportata l'area complessivamente investita dalla deposizione costiera di *lowstand* secondo quanto suggerito dalle tre fasi simulate.

3.2. Periodo trasgressivo (TST)

I depositi di questo periodo si rinvengono nel sottosuolo del delta emerso, ma è ragionevole che siano presenti anche nella stratigrafia del delta sottomarino, purtroppo irrisolta per un lungo tratto (circa 9-10 km dalla costa attuale) per mancanza di sondaggi e di risposta del segnale sismico. Al disotto della piana deltizia, il TST presenta sequenze connesse ad un sistema barriera-laguna con delta lagunare e facies più interne fluviali che evolve nella paleovalle del Tevere (Bellotti *et al.*, 1994; 1995; Di Bella *et al.*, 2013; Milli *et al.*, 2016; Tentori *et al.*, 2018). Nella sezione di *Fig. 15A*, orientata secondo la direzione dell'ingressione marina, il TST giace su depositi di piana alluvionale (*depositi 9*, vedi legenda) e si sviluppa fino alla superficie di *maximum flooding* (mfs) che lo separa dal sovrastante HST. Sull'orizzontale a parità di quota, si osservano i depositi circa-coevi del sistema costiero: di barriera (*dep. 6*), della retrostante laguna (*dep. 7*) e del delta lagunare (*dep. 8*). Le relazioni spaziali tra i depositi di barriera e laguna ben evidenziano il *backstepping* con cui tutto il sistema si è spostato irregolarmente verso terra spinto da un innalzamento del l.m. irregolare a cui corrisponde un insieme di parasequenze. Queste stesse relazioni spaziali, a scala maggiore, testimoniano effetti di "annegamento in posto" della barriera causati da brusca inversione del rapporto sedimento disponibile/innalzamento marino (Sanders e Kumar, 1975; Tortora *et al.*, 2009b).

La sezione di *Fig. 15B*, prossima e circa parallela alla costa attuale, mette in luce l'estensione laterale degli elementi stratigrafici fin qui commentati e il confinamento all'interno della paleovalle della sedimentazione trasgressiva, che qui si istaura a partire da circa 14-13000 anni dal presente. In questa sezione i depositi del delta lagunare (*dep. 8*) sono assenti

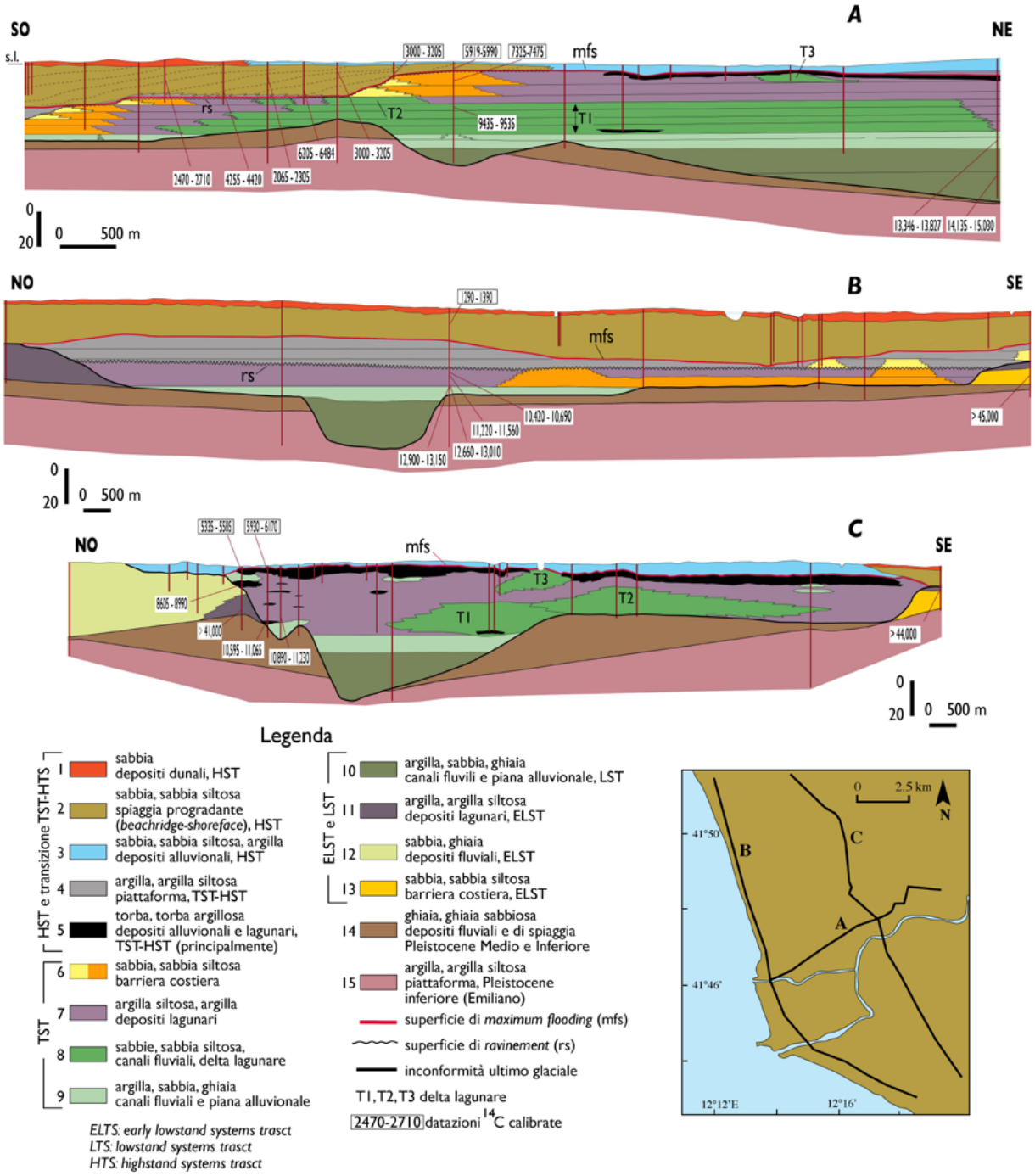


Figura 15. Stratigrafia del delta emerso (da Milli *et al.*, 2013, con modeste semplificazioni).

in quanto ubicati più internamente. La sequenza trasgressiva termina con una unità di mare aperto (*dep. 4*) che, riferita a sedimenti fini dispersi dai canali di *inlet* della barriera, è correlata con l'unità sismica trasparente (sezione condensata) presente ovunque sulla piattaforma continentale esterna (*Fig. 6*). La sezione di *Fig. 15C* intercetta un contesto deposizionale di laguna - piana alluvionale ove la barriera, posta più verso mare, non risulta visibile. La stratigrafia include depositi di piana alluvionale (*dep. 9*) con sovrapposti depositi lagunari (*dep. 7*) che imballano tre corpi lenticolari in assetto retrogradazionale (T1, T2, T3; *dep. 8*) appartenenti ad un delta lagunare che migrava lateralmente nella laguna durante l'evoluzione. La saltuaria presenza di orizzonti torbosi (*dep. 5*) nei terreni lagunari rivela effetti locali di impaludamento dovuti a momenti di stasi o diminuzione dell'innalzamento marino. L'orizzonte torboso spesso e continuo alla sommità della successione, marca la fase di transizione TST-HST con tassi di innalzamento marino assai ridotti a cui doveva corrispondere una riduzione del battente d'acqua nel bacino lagunare.

3.3. Periodo di alto stazionamento del livello marino (HST)

I numerosi sondaggi sulla piana deltizia e l'abbondanza di testimonianze archeologiche fanno sì che l'evoluzione di *highstand* è delineata molto più nel dettaglio sulla parte emersa che non in quella sommersa del delta. L'elemento dominante è l'intervenuta quasi stabilità del livello marino a cui ha corrisposto l'arresto della migrazione della barriera e un più lungo processo di adattamento spontaneo con aggiustamenti morfologici sempre più consoni alla condizione di *highstand*. Tale processo, disturbato dall'instabilità climatica del periodo (Bellotti *et al.*, 2018; e bibliografia inclusa), è con approssimazione collocabile nei primi 2-3000 anni del *highstand* quando il delta lagunare ereditato dalla trasgressione ha iniziato a trasformarsi in delta a dominio ondoso.

Il deposito del HST (Bellotti *et al.,* 1994; Milli *et al.,* 2016; 2018), tra la superficie di *maximum flooding* e quella morfologica attuale, presenta spessori variabili che sono di appena alcuni metri sulla piana deltizia interna, di una ventina di metri sulla piana esterna, e massimi (circa 70 m) all'altezza della transizione fronte-prodelta (*Fig.* 11). Se si esclude la modesta sedimentazione di *highstand* sulla piana interna, alluvionale e di colmamento della laguna trasgressiva (*Fig.* 15 A, C), il deposito del HST è quasi tutto il risultato della progradazione a dominio ondoso del delta, ed è dunque interessato al suo interno dal rinnovo di numerose superfici deposizionali ciascuna con depositi sempre più distali procedendo verso il largo. L'assetto regressivo che ne deriva è rispettato ovunque nelle sequenze stratigrafiche marine di *highstand*, che comunque si differenziano a se-

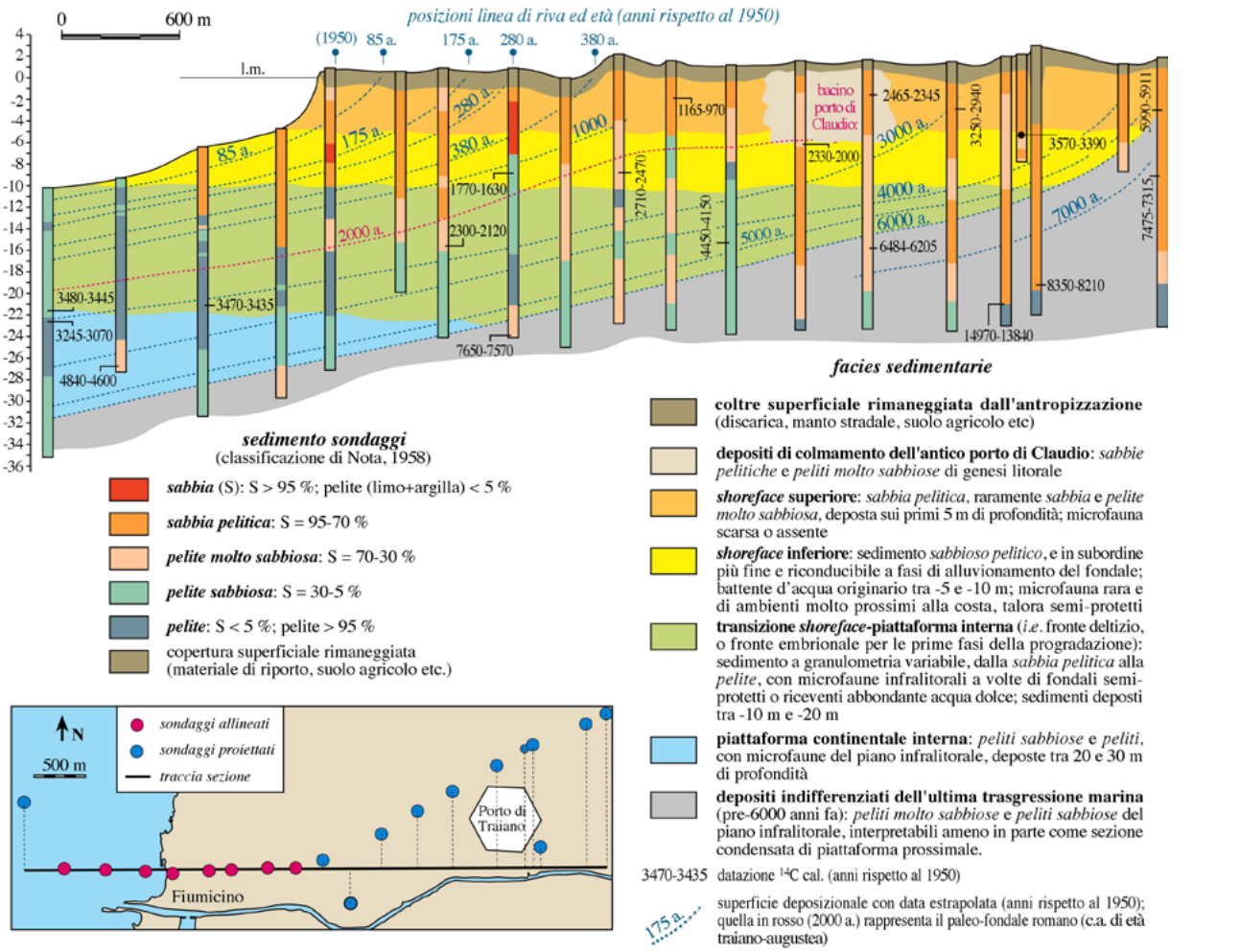


Figura 16. Sezione stratigrafica relativa alla progradazione di highstand del delta. Le facies deposizionali sono state identificate dalla lettura integrata di dati granulometrici, strutture sedimentarie, datazioni ^{14}C, analisi della microfauna, e utilizzando come ulteriore indicatore paleo-batimetrico il grafico probabilistico in *Fig.* 7 (in basso a destra). All'interno del deposito la superficie deposizionale distinta in rosso traccia il paleo-fondale di età romana (da Tortora *et al.*, 2006).

conda della loro posizione rispetto alla costa. Quelle che insistono nel sottosuolo della piana esterna comprendono, dal basso, *facies* di fronte deltizio, di *shoreface* inferiore e superiore e infine *facies* di spiaggia e duna entrambe conferenti rilievo alla topografia subaerea attuale (*beach ridge* e cordoni dunali) (*Fig.* 15 A, B; *Fig.* 16). Quelle invece che interessano la potente coltre sottostante la transizione fronte-prodelta consistono in sedimenti limoso-argillosi poco differenziati verticalmente e appartenenti ad un prodelta in progressiva crescita e riduzione del suo battente d'acqua, così come testimoniano le microfaune passanti verso l'alto da forme circalitorali a infralitorali. Ancora più verso il largo, la sismostratigrafia di *highstand* all'altezza del prodelta inferiore si caratterizza per una facies acustica, pelitica, con riflessioni interne continue di elevata ampiezza e con configurazioni subparallele e terminazioni *downlap*, quest'ultime attestanti lo spostamento verso mare del confine esterno del delta sottomarino durante la progradazione (*Fig.* 6). L'unità sismica superiore, interessata da dislocazioni per sovraccarico di sedimento, sembra ricollegabile all'ultima fase di fortissimo avanzamento della costa durante il periodo climatico della piccola era glaciale. Il deposito di *highstand* continua oltre la chiusura del delta come mantello spesso 1-2 m, campionato fino a -240 m ma probabilmente presente anche a profondità maggiori. Nel complesso è assai rilevante la massa sedimentaria pelitica deposta sulla piattaforma, così come si evince dalla carta delle isopache di *Fig.* 17 basata su dati sismici ad alta risoluzione (Chiocci e La Monica, 1996). La continuità lungo costa di questo deposito indica che la dispersione del sedimento tiberino non si arresta ai confini laterali del delta emerso, investendo un'area estesa a nord-ovest per circa 90 km fino in prossimità del promontorio di M.te Argentario, e a sud-est per circa 60 km fino al traverso di Torre Astura, poco oltre Capo d'Anzio.

Gli schemi A-D in *Fig. 18* illustrano le trasformazioni morfologiche nel corso dell'affermarsi del delta a dominio ondoso. Il primo schema, A, riferito al periodo di poco antecedente al presente *highstand*, vede una barriera discontinua e al termine della sua migrazione, che delimitava un'ampia laguna suddivisa in bacini minori per l'avvenuto avanzamento del delta lagunare, ormai con probabile foce in mare aperto. Nel periodo successivo, tra 5000-2700 anni dal presente, si sviluppò una prima cuspide (cuspide 1, *Fig. 18E*) che poi venne abbandonata per una brusca avulsione del corso fluviale, alla cui foce prese forma una seconda cuspide (cuspide 2) tra 2700-1900 anni dal presente. Lo schema di *Fig. 18B* si inserisce al termine di quest'ultimo periodo, descrivendo la costa di età romana imperiale, con riduzione degli originari bacini lagunari e interessata da influenze antropiche. Infatti nel IV secolo a.C. fu fondata vicino alla costa la città di Ostia Antica, e lungo il canale fluviale fu costruito un primo porto romano, forse utilizzando parte della laguna meridionale. In seguito fu realizzato. ove prima prese forma la cuspide 1, il porto imperiale di Claudio (I secolo d.C.) poi ampliato sotto l'impero di Traiano (II secolo d.C.) in un bacino più interno e protetto. Il Porto di Traiano era collegato al mare attraverso un canale artificiale che da allora divenne il secondo distributore del Tevere, sebbene in

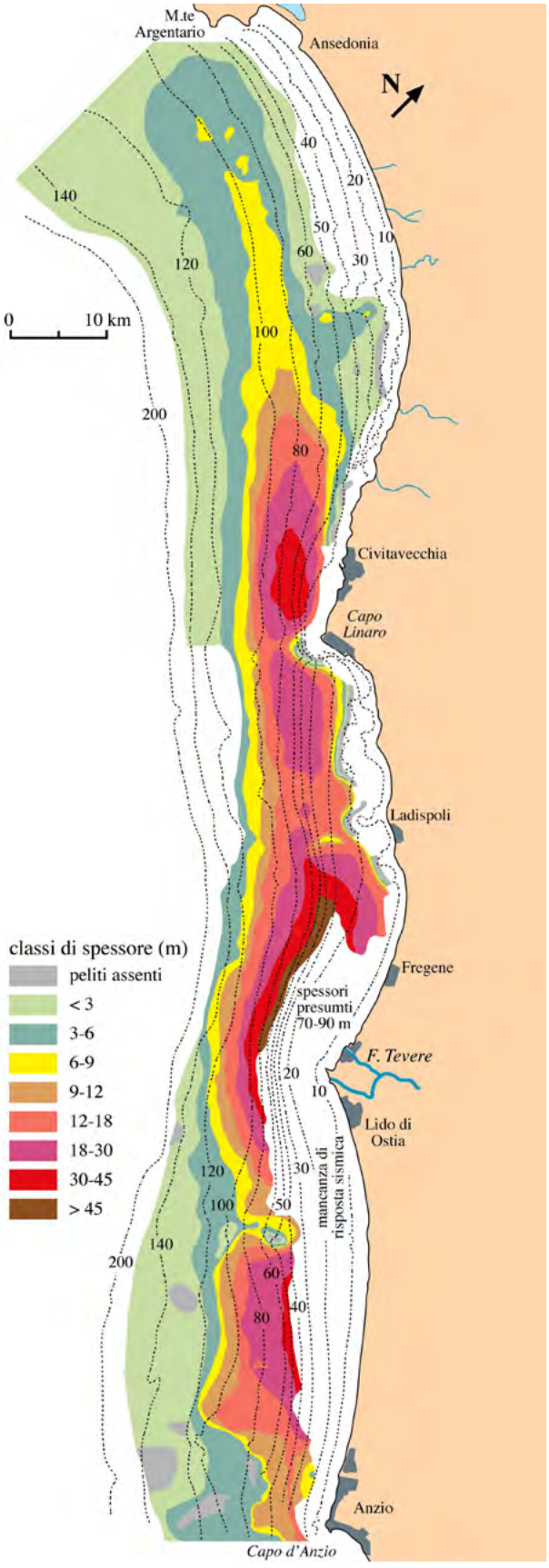


Figura 17. Spessore della coltre pelitica olocenica di origine tiberina e batimetria del fondale (i.e. il tetto della coltre). Ridisegnata da Chiocci e La Monica (1996).

tempi successivi con fasi alterne di funzionamento per l'insabbiamento della foce. Con entrambi i canali distributori attivi si formò gran parte dell'attuale *strandplain* (cuspide 3, *Fig. 18 E),* attraverso avanzamenti della costa però anche intervallati da stasi e fasi erosive, come quella verificatasi

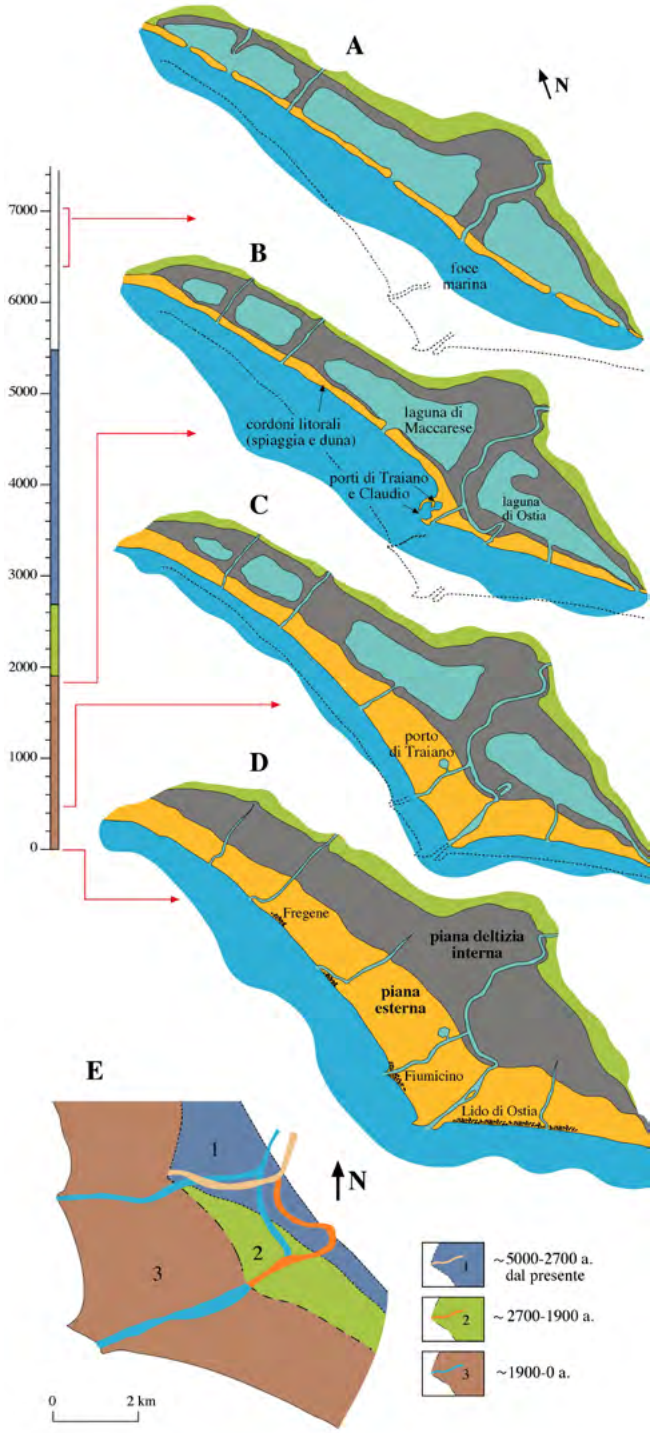


Figura 18. Modificazioni della piana deltizia dalla fase terminale della trasgressione fino al presente, con schemi (A-D) che ne fotografano l'evoluzione. In E, spostamenti del tratto terminale del Tevere durante la progradazione a dominio ondoso, e aree con *beach ridge* ricollegabili alle posizioni assunte dalla foce (da Bellotti *et al.*, 2011); i periodi a cui si riferiscono le tre cuspidi sono evidenziati in colore sulla scala-tempo degli schemi A-D.

nel periodo climatico caldo del Basso Medioevo quando la costa arretrò all'incirca nella posizione di età romana. Il periodo climatico della "piccola era glaciale" (1550-1850 d.C.), grazie ad un forte incremento dell'apporto solido fluviale, ridisegnò la morfologia della piana attraverso una straordinaria progradazione (*Fig. 18C*) terminata quasi agli inizi del secolo scorso, oltre il quale l'impatto antropico è stato l'elemento caratterizzante nella rifinitura morfologica della costa e della piana deltizia (*Fig. 18D*).

Numerosi lavori a sfondo geoarcheologico, a cui si affidano ulteriori riferimenti bibliografici, forniscono dettagli soprattutto sull'evoluzione del delta nel periodo storico (Goiran *et al.*, 2010; Bellotti *et al.*, 2011; 2018; Giraudi, 2011; Vittori *et al.*, 2015; Salomon *et al.*, 2018; 2020). Le posizioni assunte dalla linea costa nel *highstand* e nei periodi precedenti sono riportate in *Fig. 19*.

4. CONCLUSIONI

Il delta del F. Tevere è il risultato di una evoluzione complessa controllata principalmente dalle variazioni eustatiche del livello marino, dall'apporto sedimentario fluviale, e dalla morfologia del bacino accettore originario (inconformità). Si deve: (i) al primo fattore, la mobilità del delta, prima stazionante sul margine continentale (*lowstand*), poi in migrazione sulla piattaforma (trasgressione) e poi ancora stazionante in posizione alta (*highstand*); (ii) al secondo fattore, il rifornimento esclusivo della deposizione vista l'assenza di sorgenti intrabacinali significative di sedimento; (iii) al terzo fattore, il confinamento della trasgressione all'interno della paleovalle del Tevere, e lo stimolo a migrazioni (*rollover*) conservative di massa sedimentaria costiera, trasferita dalla costa di *lowstand* al deposito del TST. Durante il suo arco evolutivo, il delta passa da un contesto morfologico poco conosciuto (*lowstand*), ad uno di estuario (trasgressione) e infine ad un delta arcuato a dominio ondoso (*highstand*) ormai liberato dai vincoli morfologici della paleovalle.

Il delta attuale presenta sulla piana deltizia processi sedimentari di scarsa rilevanza e spesso innaturali per la forte antropizzazione, contrariamente alla porzione marina dell'apparato (litorale, fronte e prodelta) ove essi sono ben attivi sebbene vincolati in vario grado dalla presenza umana. Il delta è alimentato in sedimento con discontinuità e solo quando le portate liquide del fiume superano raramente alcuni valori di soglia che fanno da innesco al trasporto di limo, argilla e in subordine sabbia. La dispersione in mare di questi sedimenti è estremamente dipendente dalle condizioni meteomarine del momento, e avviene secondo due modalità principali (*end-members*): con torbida fluviale guidata dal flusso ipopicnico (mare genericamente calmo) o dal moto ondoso (mare mosso) dopo che esso ha distrutto questo flusso. Solo il sedimento fluviale deposto lato terra al ciglio del fronte deltizio viene poi ridistribuito dal moto ondoso nei lunghi periodi di scarsa attività del fiume. È questa azione conclusiva delle onde che colloca l'apparato del Tevere nella categoria dei delta a dominio ondoso. L'erosione sulla costa dell'apice deltizio (tra Focene e poco a sud del Canale dei Pescatori), come noto, è connessa alla drastica riduzione dell'apporto solido del fiume che, per cause climatiche acuite o sostituite dagli effetti della costruzione di invasi fluviali, è passato con trend progressivo da 10.6 MT/a (fine '800) a poco meno di 1 MT/a di oggi. Se si considera che circa la metà della *strandplain* deltizia è stata costruita durante il periodo della piccola era glaciale (1550-1850) grazie ad apporti fluviali non inferiori a quello di fine '800, la domanda che sorge spontanea è per quanto tempo ancora l'apporto odierno, oltremodo ridotto, riuscirà a garantire il mantenimento della forma costiera

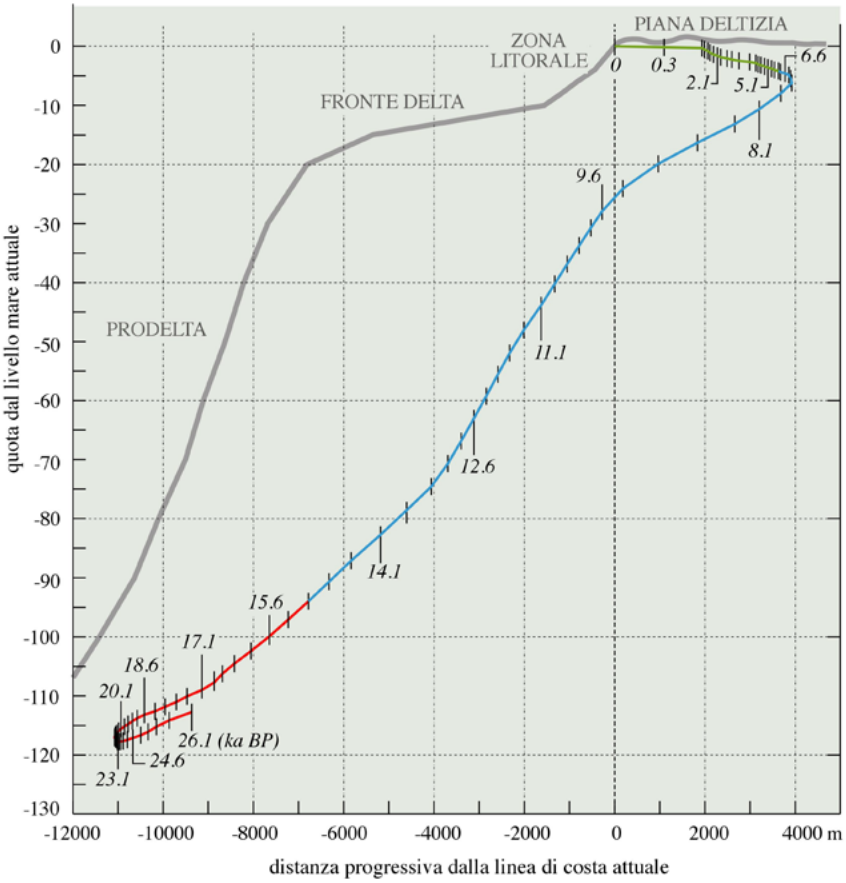


Figura 19. Traiettoria di migrazione della linea costa in fase di *lowstand* (linea in rosso), trasgressione (celeste) e *highstand* (verde), con posizioni della costa (trattini verticali) riferite ad età (ka dal presente) cadenzate di 300 anni. La traiettoria in rosso è desunta dalla simulazione di *Fig.* 14 e le traiettorie successive dall'estensione della simulazione fino al periodo attuale. In alto, come riferimento, il profilo morfologico del delta attuale.

acquisita dal passato. Sebbene senza risposta, il quesito induce lecita preoccupazione, tutt'altro che affievolita dagli scenari attesi del riscaldamento globale.

BIBLIOGRAFIA

Amenduini G. (1884). *Sulle opere di bonificazioni sulla plaga litoranea dell'agro romano che comprende le paludi e gli stagni di Ostia, Porto, Maccarese e delle terre vallive di Stracciacappa, Baccano, Pantano, e Lago dei Tartari*, relazione del progetto generale 15/7/1880 Min. LL.PP, Eredi Botta, 36 pp.

Arnoldus-Huyzendveld A. (2005). *The natural environment of the Agro Portuense*, in: Portus, an archaeological survey of the port of imperial Rome (eds: Keay S., Millett M., Paroli L., Strutt K.), British School at Rome, 14-30.

Belfiore A., Bellotti P., Carboni M. G., Chiari R., Evangelista S., Tortora P., Valeri, P. (1987). *Il delta del Tevere: le facies sedimentarie della conoide sommersa. Un'analisi statistica dei caratteri tessiturali, microfaunistici e mineralogici*, Boll. Soc. Geol. It., vol. 106, 425-445.

Bellotti P. (2018). *Regime fluviale del Tevere e variazione del litorale deltizio dal rinascimento ai nostri giorni*, Supplemento de Riparia, 1, 50-55.

Bellotti P., Biagi P.F., Tortora P., Valeri P. (1987a). *Il delta del Tevere: caratteri morfologici e sedimentologici della piana deltizia*, Giornale di Geologia, vol. 49, 89-99.

Bellotti P., Calderoni G., Carboni M.G., Di Bella L., Tortora P., Valeri P., Zernitskaya V. (2007). *Late Quaternary landscape evolution of the Tiber River delta plain (Central Italy): new evidence from pollen data, biostratigraphy and ^{14}C dating*, Z. Geomorphol., vol. 51, 505–534.

Bellotti P., Calderoni G., Di Rita F., D'orefice M., D'amico C., Esu D., Magri D., Preite Martinez M., Tortora P., Valeri P. (2011). *The Tiber river delta plain (central Italy): coastal evolution and implications for the ancient Ostia Roman settlement*, The Holocene, vol. 21, 1105-1116.

Bellotti P., Carboni M.G., Milli S., Tortora P., Valeri P. (1989). *La piana deltizia del Tevere: analisi di facies ed ipotesi evolutiva dall'ultimo lowstand glaciale all'attuale*, Giornale di Geologia, vol. 51, 71-91.

Bellotti P., Chiocci F.L., Evangelista S., Tortora P., Valeri P. (1987b). *La superficie di discordanza alla base del delta del Tevere e le sue relazioni con la geometria del corpo deltizio*, Mem. Soc. Geol. It., vol. 37, 407-415.

Bellotti P., Chiocci F.L., Milli S., Tortora P. (1993). *Variabilità nel tempo della distribuzione granulometrica sui fondali del delta del Tevere*, Boll. Soc. Geol. It., vol. 112, 143-153.

Bellotti P., Chiocci F.L., Milli S., Tortora P., Valeri P. (1994). *Sequence stratigraphy and depositional setting of the Tiber delta: integration of high-resolution seismics, well logs, and archeological data*, Journal Sedim. Research., B64 (3), 416-432.

Bellotti P., Davoli L., Sadori L. (2018). *Landscape diachronic reconstruction in the Tiber delta during historical time: a holistic approach*, Geogr. Fis. Din. Quat., vol. 41, 3-21.

Bellotti P., Davoli L., Tarragoni C. (2014). *L'evoluzione del litorale tiberino negli ultimi 3000 anni sotto le forzanti naturali e antropiche*, Studi Costieri, vol. 22, 33-43.

Bellotti P., Milli S., Tortora P., Valeri P. (1995). *Physical stratigraphy and sedimentology of the Late Pleistocene-Holocene Tiber Delta depositional sequence*, Sedimentology, 42/4, 617-634.

Bellotti P., Tortora P. (1985). *Il delta del Tevere: lineamenti batimetrici, morfologici e tessiturali della conoide sommersa e delle aree limitrofe*, Boll. Soc. Geol. It., vol. 105, 65-80.

Bellotti P., Tortora P. (1996). *I sedimenti sul fondale del delta del Fiume Tevere*, Boll. Soc. Geol. It., vol. 115, 449-458.

Bellotti P., Tortora P., Valeri P. (1989). *Sedimentological and morphological features of Tiber delta*, poster in Sedimentology, vol. 36 (5).

Belluomini G., Iuzzolini P., Manfra L., Mortari R., Zalaffi M. (1986). *Evoluzione recente del delta del Tevere*, Geologica Romana, vol. 25, 213-224.

Bencivenga M., Bersani P. (2014). *Influenza delle variazioni del clima sulle piene del Tevere a Roma*, Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 377-386.

Bersani P., Bencivenga M. (2001). *Le piene del Tevere a Roma dal V secolo A.C. all'anno 2000*, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali, 100 p.p.

Bersani P., Moretti D. (2008). *Evoluzione storica della linea di costa in prossimità della foce del Tevere*, L'Acqua, n. 5, 77-88.

Bersani P., Piotti A. (1994). *Correlazioni tra portata liquida e trasporto solido del fiume Tevere a Roma*, Idrotecnica, vol. 2, 69-78.

Birkemeier W.A. (1985). *Field data on seaward limit of profile change*, Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 111, 598-602.

Bocci D. (1892). *Il delta tiberino*, Giornale del Genio Civile, 30, 1-34.

Bortoluzzi G., Frascari F., Guerzoni S., Incremona N., Ravaioli M., Rovatti G. (1982). *Some sedimentological and chemical features of the seafloor in front of the Tiber River*, Geog. Fis. Dinam. Quat., vol. 5, 120-128.

Bruun P. (1962). *Sea level rise as a cause of shore erosion*, Journal of Waterways Harbour division, American Society of Civil Engineers, Proceedings 88, 117-130.

Caldwell R.L., Edmonds D.A., Baumgardner S., Paola C., Roy S., Nienhuis J.H. (2019). *A global delta dataset and the environmental variables that predict delta formation on marine coastlines*, Earth Surf. Dynam., vol. 7, 773–787.

Caputo C. (1989). *Il litorale laziale da Capo Linaro ad Anzio, caratteristiche fisiografiche e variazioni recenti della linea di riva*. Atti Convegno Rotary International, 19° Forum "Fascia Costiera Tosco-Ligure-Laziale", Forte dei Marmi 26-27.9.1987, 31-38.

Caputo C., Chiocci F.L., Ferrante A., La Monica G.b., Landini B., Pugliese F. (1993). *La ricostruzione dei litorali in erosione mediante ripascimento artificiale e il problema del reperimento degli inerti*, in AA.VV., La difesa dei litorali, Edizioni delle Autonomie, Roma, 122-151.

Caputo C., D'Alessandro L., La Monica G.B., Landini B., Lupia Palmieri E., Pugliese F. (1983). *Erosion problems on the coast of Latium, Italy*, in *Coastal problems in the Mediterranean Sea* (Eds: Bird E.C.F., Fabbri P.), Proceedings Symposium Held in Venice, May 1982, 59-68.

Caputo C., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Pugliese F. (1987). *Physiographic characteristics and dynamics of the shores of Rome (Italy)*, Proceeding First International Conference on Geomorphology, Chichester, Part I, John Wiley & Sons Ltd, 1185-1198.

Chiesa A., Gambarini B. (1744). *Delle cagioni e de' rimedi delle inondazioni del Tevere. Della somma difficoltà di introdurre una felice e stabile navigazione da Ponte Nuovo sotto Perugia fino alla foce della Nera nel Tevere, e del modo di renderlo navigabile dentro Roma*. Antonio de Rossi, Roma.

Chiocci F.L., Casalbore D. (2011). *Submarine gullies on Italian upper slopes and their relationship with volcanic activity revisited 20 years after Bill Normark's pioneering work*, Geosphere, vol. 7(6), 1284-1293.

Chiocci F.L., Esu F., Tommasi P., Chiappa V. (1996). *Stability of the submarine slope of the Tiber River delta*, in Landslides (Ed. Senneset K.), 521- 526.

Chiocci F.L., La Monica G.B. (1996). *Analisi sismostratigrafica della piattaforma continentale* (con carta dello spessore delle peliti oloceniche), in Il Mare del Lazio, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Regione Lazio Assessorato Opere e Reti di Sevizi e Mobilità, 41–61.

Chiocci F.L., Milli S. (1995). *Construction of a chronostratigraphic diagram for a high-frequency sequence: the 20 KY B.P. to present Tiber depositional sequence*, Il Quaternario, 8(2), 339-348.

Chiocci F.L., Normark W.R. (1992). *Effect of sea-level variation on upper-slope depositional processes offshore of Tiber delta, Tyrrhenian Sea, Italy,* Marine Geology, vol. 104, 109-122.

Cowell P.J., Kinsela M.A. (2018). *Shoreface controls on barrier evolution and shoreline change*, in: Moore L.J., Murray A.B. (Eds.), Barrier Dynamics and Response to Changing Climate. Springer International Publishing, 243-275.

Cowell P.J., Roy P.S., Jones R.A.(1992). *Shoreface Translation Model: computer simulation of coastal-sandbody response to sea level rise*, Mathematics and Computers in Simulation, vol. 33, 603-608.

Cowell P.J., Roy P.S., Jones R.A. (1995). *Simulation of large-scale coastal change using a morphological behaviour model*, Marine Geology, vol. 126, 45-61.

Cowell P.J., Stive M.J.F., Niedoroda A.W., De Vriend D.J., Swift D.J.P., Kaminsky G.M., Capobianco M.

(2003a). *The Coastal-Tract (Part 1): A conceptual approach to aggregated modelling of low-order coastal change*, Journal of Coastal Research, vol. 19, 812-827.

Cowell P.J., Stive M.J.F., Niedoroda A.W., Swift D.J.P., De Vriend D.J., Buijsman M.C., Nicholls R.J., Roy P.S., Kaminsky G.M., Cleveringa J., Reed C.W., De Boer P.L. (2003b). *The Coastal-Tract (Part 2): Applications of aggregated modeling to low-order coastal change*, Journal of Coastal Research, vol. 19, 828-848.

Cowell P.J., Thom B.G., Jones R.A., Everts C.H., Simanovic D. (2006). *Management of Uncertainty in Predicting Climate-Change Impacts on Beaches*, Journal of Coastal Research, vol. 22, 232-245.

D'Arrigo A. (1932). *Sulle fasi di regime del litorale deltizio del Tevere*. Annali LL.PP. Giornale del Genio Civile, vol. 70, 207-242.

Davoli L., Tarragoni C. (2019). *Vulnerabilità all'erosione del litorale del delta del Fiume Tevere (Mar Tirreno, Italia Centrale)*, Geologia dell'Ambiente, periodico SIGEA, supplemento al n. 3/2019, 43-48.

De Figueiredo S.A., Calliari L.J., Machado A.A. (2018). *Modelling the effects of sea-level rise and sediment budget in coastal retreat at Hermenegildo Beach, Southern Brazil*, Brazilian Journal of Oceanography, vol. 66(2), 210-219.

De Rita D., Fabbri M., Mazzini I., Paccara P., Sposato A., Trigari, A. (2002). *Volcaniclastic sedimentation in coastal environments: the interplay between volcanism and Quaternary sea level changes (central Italy)*, Quaternary International, vol. 95-96, 141-154.

Di Bella L., Bellotti P., Frezza V., Bergamin L., Carboni M.G. (2011). *Benthic foraminiferal assemblages of the imperial harbor of Claudius (Rome): further paleoenvironmental and geoarcheological evidences*, The Holocene, vol. 21, 1245-1259.

Di Bella L., Bellotti P., Milli S. (2013). *The role of foraminifera as indicators of the Late Pleistocene-Holocene palaeoclimatic fluctuations on the deltaic environment: the example of Tiber delta succession (Tyrrhenian margin, Italy)*, Quat. Int., vol. 303, 191-209.

Doglioni C., Innocenti F., Morellato C., Procaccianti D., Scrocca D. (2004). *On the Tyrrhenian sea opening*, Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, vol. 64, 147–164.

Fabbri A.G., Guerzoni S., Ravaioli M. (1984). *Experiments of multivariate classification of the sedimentary environments at the mouths of the Tiber River, Italy*, Mem. Soc. Geol. It., vol. 27, 343-360.

Ferrante A., Franco L., Boer S. (1992). *Modelling and monitoring of a perched beach at Lido di Ostia (Rome)*, Coastal Engineering Proceedings, 1(23), 3305-3318.

Folk R.L., Ward W.C. (1957). *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*, Jour. Sed. Petrol., vol. 27, 3-36.

Galloway, W.E. (1975). *Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional system*, In: Deltas, Models for Exploration (Ed. by M.L. Broussard), Houston Geol. Soc., 87-98.

Ghirlanda G., Ronda M. (1981), *Ripartizione della portata del fiume Tevere a Capo Due Rami*, Rapporto Tecnico IRSA, 78 pp.

Giraudi C. (2004). *Evoluzione tardo-olocenica del delta del Tevere*, Il Quaternario, 17(2/2), 477-492.

Giraudi C. (2011). *The sediments of the "Stagno di Maccarese" marsh (Tiber river delta, central Italy): a late Holocene record of natural and human-induced environmental changes*, The Holocene, vol. 21, 1233-1243.

Giulianelli M., Todisco A. (1978), *Rilevamento di parametri fluodinamici alla Foce del Tevere*, Atti 16° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Torino, B17, 1-11.

Goiran J.P., Salomon F., Mazzini I., Bravard J.p., Pleuger E., Vittori C., Boetto G., Christiansen J., Arnaud P., Pellegrino A., Pepe C., Sadori L. (2014). *Geoarchaeology confirms location of the ancient harbour basin of Ostia (Italy)*, J. Archaeol. Sci., vol. 41, 389-398.

Goiran J.P., Tronchère H., Salomon F., Carbonel P., Djerbi H., Ognard C. (2010). *Palaeoenvironmental reconstruction of the ancient harbors of Rome: Claudius and Trajan's marine harbors on the Tiber delta*, Quat. Int., vol. 216, 3-13.

Hallermeier R.J. (1978). *Uses for a calculated limit depth to beach erosion*, Proceedings 16th Internation Conference of Coastal Engineering, HASCE, Hamburg, 1493-1512.

Hallermeier R.J. (1981). *Seaward limit of significant by waves: an annual zonation for seasonal profiles*, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Egineering Research Center CETA, 81-2, 24 pp.

IRSA, Istituto Ricerca Sulle Acque (1980). *Indagine sull'immissione del Fiume Tevere nel Mar Tirreno*, Progetto Finalizzato "Promozione qualità dell'ambiente", Quaderno 62, Consiglio Nazionale delle Ricerche, 32 pp.

Istituto Idrografico della Marina (1982). *Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani*, Genova, 22 pp.

Kori K., Saito Y. (2022). *Classification, architecture, and evolution of large river deltas*, in Large Rivers: Geomorphology and Management (Ed. by A. Gupta), chapter 6, John Wiley & Sons Ltd, 114-145.

Kuenzer C., Heimhuber V., Huth J., Dech S. (2019). *Remote sensing for the quantification of land surface dynamics in large river delta regions - A review*, Remote Sensing, vol. 1(17), Published online.

Lechi G.M., Todisco A. (1980). *Prospettive dell'impiego del telerilevamento nello studio della dispersione a mare di scarichi idrici inquinanti*, Collana P.F." Promozione della Qualità dell'Ambiente", AQ/6/2, 141 pp.

Marani M., Taviani M., Trincardi F., Argnani A., Bosetti A.M., Zitellini N. (1986). *Pleistocene progradation and post-glacial events of the NE Tyrrhenian continental shelf between the Tiber River delta and Capo Circeo*, Memorie Società Geologica Italiana, vol. 36, 67-89.

Mazzini I., Faranda C., Giardini M., Giraudi C., Sadori L. (2011). *Late Holocene palaeoenvironmental evolution of the Roman harbour of Portus, Italy*, J. Paleolimnol., vol. 46, 243-256.

Mikhailova M.V., Bellotti P., Tortora P., Valeri P. (1999). *Intrusion of seawater into the river part of the Tiber mouth*, Water Resources, vol. 26, 757-764.

Milli S., D'Ambrogi C., Bellotti P., Calderoni G., Carboni M.G., Celant A., Di Bella L., Di Rita F., Frezza V., Magri D., Pichezzi R.M., Ricci V. (2013). *The transition from wave-dominated estuary to wave-dominated delta: The Late Quaternary stratigraphic architecture of Tiber River deltaic succession (Italy)*, Sedimentary Geology, vol. 284/285, 159-180.

Milli S., Mancini M., Moscatelli M., Stigliano F., Marini M., Cavinato G.P. (2016). *From river to shelf, anatomy of a high-frequency depositional sequence: the Late Pleistocene to Holocene Tiber depositional sequence*, Sedimentology, vol. 63, 1886-1928.

Nienhuis J.H., Ashton A.D., Edmonds D.A., Hoitink A.J.F., Kettner A.J., Rowland J.C., Törnqvist T.E. (2020). *Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain*, Nature, vol. 557, issue 7791, Published online.

Passalacqua P., Giosan L., Goodbred S., Overeem I. (2021). *Stable ≠ sustainable: delta dynamics versus the human need for stability*, Earth's Future, 9, issue 7, John Wiley & Sons, 10 pp.

Peccerillo A. (2005). *Plio-Quaternary Volcanism in Italy, Petrology, Geochemistry, Geodynamics*, Heidelberg, Springer, 365 pp.

Peltier W.R., Fairbanks R.G. (2006). *Global glacial ice volume and last glacial maximum duration from an extended Barbados sea level record*, Quaternary Science Reviews, vol. 25, 3322-3337.

Ponzi (1875). *Il delta del Tevere: storia naturale del Tevere*, Boll. Soc. Geog. It., vol. 12, 1-22.

Sadori L., Mazzini I., Pepe C., Goiran J.-P., Pleuger E., Ruscito V., Salomon F., Vittori C. (2016). *Palynology and ostracodology at the Roman port of ancient Ostia (Rome, Italy)*, The Holocene, vol. 26, 1502-1512.

Salomon F., Goiran J.P., Noirot B., Pleuger E., Bukowiecki E., Mazzini I., Carbonel P., Gadhoum A., Arnaud P., Keay S., Zampini S., Kay S., Raddi M., Ghelli A., Pellegrino A., Morelli C., Germoni P. (2018). *Geoarchaeology of the Roman port-city of Ostia: fluvio-coastal mobility, urban development and resilience*, Earth Sci. Rev., vol. 177, 265-283.

Salomon F., Goiran J.P., Pannuzi S., Djerbi H., Rosa C. (2017). *Long-term interactions between the Roman City of Ostia and its paleomeander, Tiber Delta, Italy*, Geoarchaeology, vol. 32, 215-229.

Salomon F., Vittori C., Noirot B, Pleuger E., Rosa C., Mazzini I., Carbonel P., Djerbi H., Bellotti P., Goiran J.P. (2020). *Reconstruction of the Tiber Deltaic stratigraphic successions near Ostia using the PADM chart and tracking of the bedload-derived facies (Rome, Italy)*, Geomorphology, vol. 365, 1-19.

Sanders J.E., Kumar N. (1975). *Evidence of shoreface retreat and in-place "drowning" during Holocene submergence of barriers, shelf off Fire Island, New York*, Geological Society of America Bulletin, vol. 86 (1), 65-76.

Segre A .G. (1967), *Note illustrative F°149 (Cerveteri) della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000*, in Dragone *et al*., Serv. Geol. It., 1-94.

Syvitski J.P.M., Kettner A.J., Overeem I., Hutton E.W.H., Hannon M.T., Brakenridge G.R., Day J., Vörösmarty C., Saito Y., Giosan L., Nicholls R.J. (2009). *Sinking deltas due to human activities*, Nature Geoscience, vol. 2, Issue 10, 681-686.

Tacconi P., De Rosa P., Fredduzzi A., Cencetti C. (2020). *Il fiume Tevere: produzione di sedimenti, trasporto solido, centrali idroelettriche e deficit sedimentario alla foce. Il "nodo" di Corbara-Alviano. Università degli Studi di Perugia*, Collana Culture Territori Linguaggi, 53-78.

Tarantola A. (1987). *Inverse problem theory: methods for data fitting and model parameter estimations*, Elsevier, Amsterdam, 613 pp.

Tarragoni C., Bellotti P., Davoli L., Raffi R., Lupia Palmieri E. (2014). *Assessment of coastal vulnerability to erosion: the case of Tiber River Delta (Tyrrhenian Sea, Central Italy)*, Italian Journal of Engineering Geology and Environment, vol. 2, 5-16.

Tentori D., Milli S., Marsaglia K.M. (2018). *A source-to-sink compositional model of a present highstand: an example in the low-rank Tiber Depositional Sequence (Latium Tyrrhenian margin, Italy)*, Journal Sedimentary Research, vol. 88, 1238-1259.

Tortora P. (1995). *La superficie deposizionale del delta sottomarino del Tevere: zonazione del sedimento e processi associati*, Boll. Soc. Geol. It., vol. 114, 89-105.

Tortora P. (1999a). *Una classificazione ternaria per la descrizione del sedimento sui fondali marini*, Boll. Soc. Geol. It., vol. 118, 65-73.

Tortora P. (1999b). *Modelli di distribuzione granulometrica sui fondali marini attraverso la Trend Surface Analysis*, Geologica Romana, vol. 35, 199-209.

Tortora P., Bellotti P., Bergamin L., Di Bella L., Gaglianone G., Ticconi M., Valeri P. (2006). *Studio per l'identificazione del paleo-fondale di età romana nel sottosuolo dell'area del futuro porto di Fiumicino*, rapporto convenzione Dip. Scienze della Terra Università di Roma "La Sapienza" e Autorità Portuale di Civitavecchia, Fiumicino e Gaeta, 66 pp.

Tortora P., Cowell P.J., Adlam K. (2009a). *Transgressive coastal systems (1st part): barrier migration processes and geometric principles*, Journal of Mediterranean Earth Sciences, vol. 1, 1-13.

Tortora P., Cowell P.J., Adlam K. (2009b). *Transgressive coastal systems (2nd part): geometric principles of stratal preservation on gently sloping continental shelves*, Journal of Mediterranean Earth Sciences, vol. 1, 15-32.

Trincardi F., Normark W.R. (1988). *Sediment waves on the Tiber prodelta slope; interaction of deltaic sedimentation and currents along the shelf*. Geo-Mar. Lett., vol. 8, 149-157.

Vittori C., Mazzini I., Salomon F., Goiran J.P., Pannuzi S., Rosa C., Pellegrino A. (2015). *Palaeoenvironmental evolution of the ancient lagoon of Ostia Antica (Tiber delta, Italy)*, J. Archaeol. Sci., vol. 54, 374-384.

L'erosione costiera nel Cilento meridionale (Campania, Italia): criticità e ipotesi di interventi

Coastal erosion in southern Cilento (Campania, Italy): critical issues and possible interventions

Alessio Valente
Dipartimento di Scienze e Tecnologie, Università degli Studi del Sannio, Benevento

E-mail: valente@unisannio.it

Parole chiave: spiagge, falesie, erosione costiera, opere di difesa
Key words: beach, cliff, coastal erosion, mitigation defence

Le ricerche sviluppate sulle coste meridionale del Cilento in Campania (Italia meridionale) evidenziano vistosi fenomeni erosivi sia nei tratti coincidenti con le spiagge che in quelli dove si mostra con falesie alte e rocciose (GNRAC, 2007; Regione Campania, 2007). Nei primi si registra un arretramento della linea di riva enfatizzatosi soprattutto negli ultimi decenni, mentre nei secondi si rilevano frane di ogni tipologia e dimensione con diverse ripercussioni verso l'entroterra. In alcuni casi l'erosione ha messo in crisi le pregevolissime caratteristiche ambientali della costa, tutelate non solo nell'ambito del Parco Nazionale, inserito nella rete globale dei Geoparchi dell'UNESCO (Aloia *et al*, 2011; De Vita *et al*., 2013), ma anche negli habitat ricadenti nei Siti di Interesse Comunitario della Regione Biogeografica Mediterranea diffusi nell'area e nelle Aree Marine Protette istituite a difesa dei suggestivi fondali (D'Angelo *et al*., 2019). Tali condizioni potrebbero nel tempo avere serie conseguenze anche sull'attrattività turistica di queste coste e quindi sull'economia dei comuni di Pisciotta, Centola e Camerota che si reggono principalmente sulle attività balneari sviluppate nella lunga stagione estiva cilentana (Valente *et al*., 2017).

Ancora oggi, nonostante la premessa, osservare la costa meridionale del Cilento significa rimanere stupiti della diversità nei tipi costieri (Guida *et al*., 2014). Infatti, in poco più di una trentina di chilometri a partire da Punta del Telegrafo fino alla Punta degli Infreschi si succedono lungo la linea di riva falesie ripide o pendii scoscesi alternate a spiagge sabbiose o ciottolose, talvolta continue per lunghi tratti (Le Saline e Cala del Cefalo) e talaltra preservate solo in insenature profonde (es. La Calanca), ma anche promontori proiettati significativamente verso mare con balze alquanto ripide (Capo Palinuro). Non mancano sbocchi a mare di torrenti, per lo più asciutti in gran parte dell'anno, insistenti soprattutto nel settore settentrionale così come foci di due fiumi importanti come il Lambro ed il Mingardo in quello meridionale. In questo contesto vi sono anche tratti costieri (Marina di Pisciotta, Palinuro, Marina di Camerota) che sono stati attrezzati per ospitare imbarcazioni un tempo per la pesca ed ora in modo crescente per le imbarcazioni da diporto. Focalizzare le osservazioni sull'uno o l'altro tipo costiero potrebbe essere riduttivo, tuttavia lo scopo di questo contributo avrà una maggiore attenzione sulle spiagge di questo settore costiero, anche se si daranno degli spunti sulle adiacenti falesie. Quest'ultime, infatti, possono interferire con i processi costieri che determinano la stabilità o l'instabilità dell'accumulo sedimentario di una costa definita bassa.

La diversità nei tipi costieri è da imputare principalmente ai caratteri litologici di queste coste, piuttosto unici nel contesto del segmento meridionale della catena appenninica (ISPRA, 2013; Guida *et al*., 2016). Si potrebbe dire che nell'unità fisiografica settentrionale a nord del promontorio di Capo Palinuro prevalgono successioni, estremamente deformate, costituite da calcilutiti e calcareniti alternate a marne calcaree scagliose in strati medi e spessi, che verso l'alto sono sostituiti da torbiditi arenaceo-pelitiche in strati sottili e medi. Anche se solo limitatamente per poche decine di metri alla base di queste successioni affiorano argilliti foliate con intercalazioni di sottili strati torbiditici. Nel complesso queste successioni sono incluse nelle cosiddette Unità Liguridi (Eocene superiore-Miocene inferiore) (Vitale *et al*., 2019). Esse rappresentano le unità più interne dell'orogene appenninico, nonché le prime a deformarsi all'incirca nel Burdigaliano superiore. Per un breve tratto della costa si trovano anche le successioni basali costituite dalle torbiditi arenaceo-pelitiche in strati tabulari da medi a sottili e con orizzonti pelitici solitamente ridotti riferibili

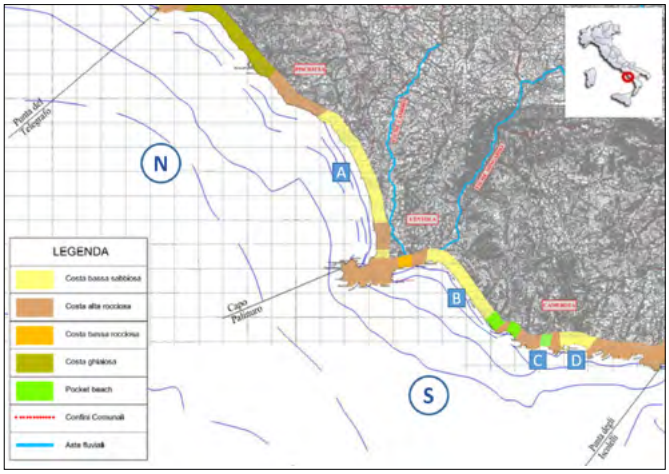


Figura 1.Tipi costieri del Cilento meridionale. Nell'unità fisiografica N con la spiaggia de Le Saline (A) e nell'unità fisiografica S con le spiagge di Cala del Cefalo (B), de La Calanca (C) e di S.Domenico – Lentiscelle (D).

al Gruppo del Cilento (Miocene inferiore). Queste alternanze si formarono sulle unità anzidette, già deformate in un bacino marino profondo (thrust-top basin), come testimonia la discordanza basale.

Invece, a partire già dal promontorio di Capo Palinuro e quindi in tutta l'unità fisiografica meridionale affiorano esclusivamente i termini basali dei depositi di piattaforma carbonatica (ISPRA, 2013). In particolare, solo all'estremità dell'unità fisiografica si osservano le dolomie e i calcari in strati spessi e banchi del Trias superiore, mentre per gran parte dell'unità costiera si estendono i calcari massivi e mal stratificati del Giurassico inferiore. Essi costituiscono i depositi delle successioni pre-orogeniche del margine interno della piattaforma appenninica, cioè dell'Unità di Monte Bulgheria, coinvolte nel trasporto orogenico durante il Serravalliano – Tortoniano inferiore p.p. Conseguentemente quanto è esposto sulle falesie è rappresentativo delle propaggini costiere del Monte Bulgheria che con i suoi 1225 m sovrasta il paesaggio cilentano meridionale.

Sulle successioni terrigene e su quelle carbonatiche, a volte immediatamente al retro della linea di costa, talaltra sollevate a diverse quote sui terrazzi d'abrasione marina, ben visibili lungo i profili del massiccio del Monte Bulgheria, si ritrovano i depositi quaternari (ISPRA, 2013; Esposito *et al*., 2003). Tra quelli più "strettamente costieri" prevalgono, le calcareniti con bioclasti nella parte inferiore e da sabbie a laminazione incrociata nella parte superiore di origine eolica, la cui messa in posto sarebbe successiva al Tirreniano, cioè allo stage isotopico 5e corrispondente a circa 124 ka (Plestocene superiore p.p.: Sintema di Palinuro). Sulla superficie terrazzata modellata in questo picco solo nell'unità fisiografica settentrionale affiora, altresì, in bella esposizione una successione rappresentativa della progradazione di una spiaggia verosimilmente formatasi nel corso dello stage isotopico 7 corrispondente a circa 243 ka (Pleistocene medio p.p.: Sintema di Policastro). Nell'unità fisiografica meridionale i depositi quaternari, escludendo quelli dislocati in quota, si restringono ai depositi di spiaggia antica coperta da vegetazione a ridosso di falesie "morte" (es. Cala del Cefalo), alle alluvioni terrazzate del I ordine lungo le parti terminali del Lambro e del Mingardo e quindi ai limitati affioramenti dei depositi ghiaiosi-sabbiosi, frequentemente rubefatti, di ambiente fluviale e litorale del Pleistocene medio (Sintema di Policastro) e ai sottostanti depositi con puddinghe a clasti carbonatici del Pleistocene inferiore (Sintema di Lentiscosa) affioranti a ridosso della costa di Marina di Camerota.

Figura 2. Il tratto a sud di Punta del Telegrafo (visibile sullo sfondo) con in primo piano uno degli accumuli di ciottolame eterometrico alla base del pendio scosceso.

Figura 3. La costa sottesa dal porticciolo di Marina di Pisciotta.

Questo contesto litologico emerso può ritrovarsi in diversi tratti anche nelle porzioni sommerse, a costituire, in modo contiguo alla linea di riva, superfici terrazzate estese ovvero residuali, influenzando la progressione del moto ondoso verso la costa. Inoltre, di frequente per lunghi tratti queste forme sommerse sono ricoperti da sedimenti in cui sono impiantate praterie di fanerogame marine (Posidonia oceanica e Cymodocea nodosa), che attenuano anch'esse l'intensità delle onde (D'Angelo *et al*., 2019). Comunque, la costa è approssimativamente esposta ad onde provenienti da sud-ovest con un fetch geografico di 1800 km nella direzione 260° N e valori di fetch efficaci di 600 km nella direzione 245° N, nel complesso le ondazioni prevalenti sono da ovest e sud-ovest.

A partire da Punta del Telegrafo fin quasi al porticciolo di Marina di Pisciotta, nella dinamica sedimentaria, che modella questo tratto di litorale, sono da considerare soprattutto gli apporti significativi derivanti dai fenomeni gravitativi di cui soffrono le falesie ripide e i pendii scoscesi (De Vita *et al*., 2013) (Fig. 2). Tali fenomeni determinano accumuli in corrispondenza della linea di riva, costituiti da ciottolame eterometrico, anche grossolano fino a blocchi, che solo apparentemente sembra farla progradare. In realtà, il moto ondoso e le correnti da esse indotte, dirette verso sud, ne ridistribuiscono gli elementi meno grossolani su questo tratto fino a costituire delle ristrette spiagge, in cui la granulometria gradualmente tende lungo costa a diventare sabbiosa con un miglioramento nella selezione. La presenza di aggetti trasversali alla costa può determinarne una maggiore estensione dell'accumulo, come si verifica a ridosso del molo del porticciolo anzidetto (Fig. 3). Per preservare queste spiagge, o più correttamente le strutture balneari e le infrastrutture connesse in un recente passato, sono state realizzate opere addossate alla linea di riva o leggermente distaccate e quindi sommerse che, nella maggior parte dei casi, non hanno avuto effetti risolutivi.

Proseguendo verso sud si sviluppa una spiaggia, denominata Le Saline, che si estende quasi ininterrottamente per oltre 1200 m. Essa ha un andamento plano-altimetrico nord-sud ed è delimitata da un cordone dunale in erosione,

Figura 4. Profilo della spiaggia de le Saline delimitata dalla duna vegetata.

Figura 5. Il tratto meridionale della spiaggia de Le Saline durante una mareggiata, che espone la beachrock e riduce l'ampiezza della spiaggia.

a tratti antropizzato. La spiaggia emersa risulta costituita prevalentemente da sedimento sabbioso di media granulometria e ben classato, anche se non mancano localmente sedimenti a maggiore granulometria scarsamente classati (Fig. 4). Mentre, nella spiaggia sommersa, la sabbia pur mantenendo la stessa granulometria per un ampio tratto (fino a circa -8m), si presenta con una minora classazione e con una frazione fine crescente. Sempre nella zona sommersa, ma solo per un primo tratto entro la profondità di 5 m sono distinguibili, in modo discontinuo, fino a due ordini di barre sabbiose con relativi truogoli. Invece, nella restante parte, in luogo di queste barre, con maggiore continuità nel resto della porzione sommersa meno profonda si osserva una "piastra" di diversi metri di larghezza e all'incirca di 1 km di lunghezza di sedimento litificato (beachrock), dato da un'arenaria quarzosa ricca di frammenti di molluschi. Il suo spessore varia da poche decine di centimetri a più di 2 m e si sviluppa entro i -5 m e talvolta si estende, anche alla spiaggia emersa (Fig. 5). Da una prima analisi, durante le ondazioni più intense, alcune incisioni trasversali presenti in questa piastra potrebbero rappresentare delle vie di fuga preferenziali dei sedimenti verso i fondali più profondi. Non mancano in questi fondale, oltre i 20 m, le praterie di Fanerogame, con densità maggiore nelle aree senza la "piastra" di beachrock. Al retro di quel che resta della duna, oltre la strada litoranea, affiora quello che è considerato un "gentile" declivio costituito da pochi metri di un deposito del ciclo marino-continentale della parte alta del Pleistocene medio (Sintema di Policastro), passanti verso l'alto per poco meno di dieci metri alle calcareniti, ricchi di bioclasti, nella parte inferiore e sabbie a laminazione incrociata nella parte superiore della parte bassa del Pleistocene superiore (Sintema di Palinuro). Questa successione è fortemente soggetta ad erosione, al punto da essere stata profondamente incisa (gullies) e i sedimenti, così rimobilizzati, raggiungono in parte la spiaggia emersa. La differenza nei caratteri della spiaggia de Le Saline induce a considerare un controllo significativo nella dinamica sedimentaria e quindi una tendenza evolutiva che mostra nello spazio e nel tempo alternanze di arretramento e di avanzamento della linea di riva. Le intensità di queste variazioni specie nel primo tratto sono dell'ordine di 15-20 m, anche se gli arretramenti possono superare i 30 m, mentre nel secondo tratto, in corrispondenza della beachrock, tendono ad annullarsi. Tuttavia, la "piastra" tende a perdere in modo crescente la sua copertura sabbiosa, e quindi il progressivo allontanamento dei sedimenti verso il largo (Fig. 5).

Figura 6. Il promontorio di Capo Palinuro: lateralmente si sviluppano la spiaggia de Le Saline e quella di Cala del Cefalo.

Proseguendo verso sud si incontra la banchina di meno di 200 m addossata alla linea di riva e il molo foraneo di circa 160 metri, orientato all'incirca SW-NE, che costituiscono il porto di Palinuro, consentono di proteggere una spiaggia piuttosto ristretta formatasi nel tratto di costa antecedente alla tipologia che caratterizza l'intero promontorio di Capo Palinuro (Fig. 6).

Infatti, subito dopo di questa piccola spiaggia, la costa si mostra particolarmente alta e di frequente aggettante senza alcuna copertura vegetale, con calcari dolomitici, dolomie e calcareniti del Giurassico inferiore in bella esposizione. L'alimentazione della spiaggia, oltre che dal mare verosimilmente dal settore di traversia lasciato esposto, è da alcuni fossi che incidono il versante vegetato con sedimenti sabbiosi del Pleistocene superiore (Sintema di Palinuro).

Al di là del promontorio di Capo Palinuro e dopo le foci del Lambro e del Mingardo si sviluppa per quasi 3500 m la spiaggia di Cala del Cefalo, uno degli elementi fisiografici più significativi di questa costa del Cilento (Valente *et al*., 2013). Essa si allarga fino ad un massimo di 250 m e se non ci fosse la strada (ex-S.S. 562 Palinuro - Marina di Camerota), che la delimita, raggiungerebbe i versanti calcareo-dolomitici che la bordano verso terra. Tali versanti appartengono ad una cresta montuosa che raggiunge i 525 m, incisi da diversi valloni e impluvi naturali poco attivi, sia in termini di portata idraulica sia in termini di apporto sedimentario. Questi versanti, specie nelle porzioni inferiori risultano pressoché verticali (falesie inattive) con evidenti blocchi sconnessi e svincolati cinematicamente ad indicare una instabilità diffusa. Tale instabilità potrebbe essere messa in relazione non solo con la tettonizzazione che ha subito l'ammasso roccioso calcareo, ma anche con la morfogenesi che nel passato ha lasciato diverse tracce (solchi di battente, grotte, ecc.) che possono enfatizzare la pericolosità di crollo e/o ribaltamento (Fig. 7).

Questa spiaggia si caratterizza per l'estensione della duna, peraltro fissata dalla vegetazione tipica della zona mediterranea, ma nonostante sia protetta dalle norme europee e nazionali, nella sua parte meridionale, risulta completamente alterata, se non addirittura obliterata, dalla strada suddetta e dall'accelerazione dei fenomeni erosivi della spiaggia emersa. La morfologia della spiaggia emersa in alcuni segmenti è stata alterata pesantemente da strutture turistico-balneari, anche se alcune sono montate solo stagionalmente. Lungo la battigia prevalgono sedimenti sabbiosi, anche se in taluni tratti la granulometria diventa alquanto grossolana da presentare ciottoli e persino blocchi decimetrici (Fig. 8).

Figura 7. Visione da sud della spiaggia di Cala del Cefalo: si nota lo sviluppo dell'ampia duna vegetata e la falesia calcarea retrostante.

Figura 8. Profilo della spiaggia di Cala del Cefalo delimitata dalla duna vegetata. Nella sabbia si intravedono dei blocchi calcarei a protezione verosimilmente delle strutture nell'area retrostante.

La spiaggia sommersa evidenzia una prima fascia, piuttosto acclive soprattutto all'estremità meridionale, ed un'altra più al largo, praticamente suborizzontale. Questi caratteri potrebbero enfatizzare l'intensità del moto ondoso e delle correnti da esso indotte. Tra queste possono essere citati i fenomeni di risucchio (rip current), le cui tracce, rappresentati da canali trasversali alla costa, sono rintracciabili nei fondali del tratto meridionale. Solo nel fondale i sedimenti sabbiosi rapidamente rientrano nelle classi fini e molto fini, ad indicare un'influenza dell'apporto fluviale.

Questo apporto purtroppo non risulta, invece, vantaggioso per la spiaggia di Cala del Cefalo, nonostante la presenza dei fiumi Lambro e Mingardo, che sfociano a ridosso della sua estremità settentrionale, in quanto essendo di natura prevalentemente fine, tende a disperdersi al largo a discapito dell'accumulo in spiaggia. Nel passato, comunque, sia il Mingardo che il Lambro sono stati oggetto di ingenti prelievi di materiale in alveo. Il Piano Stralcio di Erosione Costiera (Regione Campania, 2007) ha valutato che nel periodo 1979-1993 sono stati prelevati complessivamente 80.400 m^3 dal Mingardo, mentre dal Lambro sono stati prelevati, nel periodo tra il 1984 ed il 1994, 14.700 m^3 di sedimenti. Pertanto l'evoluzione subita negli ultimi anni dalla spiaggia Cala del Cefalo trova una spiegazione nella riduzione degli apporti solidi del Fiume Mingardo. La posizione della linea di riva è costantemente arretrata nel tempo e confrontando la posizione storica del 1984 con quella attuale si osserva un arretramento medio di oltre 40 m. In dettaglio, si osserva come i valori maggiori siano stati misurati nei tratti contigui alla foce del Mingardo, e ciò nonostante che siano state nel recente passato inutilmente realizzate delle opere di difesa. I valori dell'arretramento tendono quindi gradualmente a ridursi ed a riprendersi nettamente all'estremità della spiaggia, laddove alcuni speroni rocciosi prima distanti dalla linea di riva ora ne sono ben oltre. I risultati ottenuti mostrano che in meno di cinquanta anni il litorale è stato oggetto di fenomeni di erosione che hanno comportato l'arretramento della linea di riva con un tasso compreso all'incirca di -1.5 m/anno con una perdita di sedimento complessiva di oltre 70.000 m^3/anno.

Superata la spiaggia sabbiosa di Cala del Cefalo, la costa si contraddistingue da tratti di costa alta e rocciosa con intercalate diverse insenature che di fatto rappresentano sistemi indipendenti dal punto di vista morfologico. Procedendo da ovest verso est, si incontrano Cala Finocchiara e Cala d'Arconte e quindi La Calanca, che merita una descrizione specifica. Comunque, per la prima insenatura prevalgono ancora i litotipi calcareo-dolomitici, mentre per quelle successive affiorano depositi diversi per natura ed età. In particolare, nella Cala d'Arconte affiorano puddinghe a grossi clasti, fino a blocchi, di natura carbonatica, passanti verso l'alto a puddinghe meno grossolane e quindi a calcareniti con stratificazione incrociate di età Pleistocenica inferiore (Sintema di Lentiscosa). Le spiagge entro le insenature della Finocchiara e dell'Arconte presentano una classificazione granulometrica da sabbioso-ciottolosa a ciottolosa, con una decisa "ripulitura" del sedimento più fine. Questo sedimento, ad eccezione di quella di Arconte, deriva in gran parte dall'apporto di piccoli fossi, che lo scaricano dopo un breve trasporto. Nonostante, la difficile rimozione di sedimenti così grossolani, non si può affermare che, la linea di riva sia rimasta stabile, anzi se ne osserva un arretramento costante.

La spiaggia de La Calanca, anche se di estensione ridotta (circa 284 m), ha una sua rilevanza per diversi aspetti (Fig. 9). Si sviluppa entro una piccola baia confinate da due promontori (Promontorio di Torre dell'Isola, ad ovest, e Promontorio delle Bacinelle, ad est), e quindi può essere classificata dal punto di vista morfologico come una pocket beach.

Figura 9. Il tratto meridionale dell'unità fisiografica S con le spiagge de La Calanca (al centro delle foto) e di S.Domenico – Lentiscelle poste rispettivamente ai lati del porticciolo di Marina di Camerota (a destra nella foto).

Figura 10. La "pocket beach" de La Calanca delimitata nell'area retrostante da una falesia costituita da depositi costieri del Pleistocene inferiore, al cui top sono evidenti importanti strutture turistiche.

Di fatto gli scambi di sedimenti con i litorali adiacenti sono nulli a molto piccoli. Questo comporta che il bilancio sedimentario di questa spiaggia dipende principalmente dall'equilibrio tra l'azione del moto ondoso e i limitati apporti solidi provenienti dall'erosione superficiale del territorio retrostante. Quest'ultimo è contraddistinto, infatti, dall'occupazione crescente di suolo a monte della spiaggia da parte di svariate strutture turistiche e residenziali afferenti a Marina di Camerota, che hanno reso ancora meno efficienti il ruolo dei valloni che giungono alla spiaggia. La duna in questo tratto appare inesistente, tuttavia granulometricamente risulta ancora distinguibile, con una sabbia media ben classata a ridosso del versante retrostante, pressoché verticale. Avvicinandosi alla battigia il granulo medio tende a diventare più grossolano pur rimanendo nell'ambito delle sabbie, anche se non sembra risolutiva l'azione selettiva del moto ondoso. Sono, infatti, presenti campioni con eccesso di fini ed un grado di selezione mediocre. Il fondale antistante a La Calanca si mostra piuttosto regolare, anche se all'estremità orientale si evidenzia un canale ad est con testata già a basse profondità e su quella occidentale un altro più pronunciato con imbocco più pronunciato a maggiori profondità. L'azione delle correnti sembrano svolgere un ruolo importante nei caratteri sedimentari dei fondali che, oltre ad evidenziare una graduale diminuzione della granulometria, mostrano una buona classazione. Dal 1984 ad oggi si può appurare la tendenza all'arretramento della linea di battigia che ha interessato questa spiaggia sia per il netto decremento degli apporti sia per l'efficacia del moto ondoso e delle correnti. Confrontando la posizione storica del 1984 con quella attuale, infatti, si osserva un arretramento, nel tratto mediano della falcata sabbiosa, di oltre 20 m. Nello stesso periodo è stata calcolata una perdita verso il largo che ammonta a circa 1600 mc/anno, sempre più in aumento negli ultimi anni (Fig. 10).

Le ultime spiagge, che saranno prese in esame si collocano in una baia, che comprende nel suo lato occidentale il porto di Marina di Camerota. Le spiagge di San Domenico e Lentiscelle nel suo lato orientale sono distinguibili per la presenza dello sperone roccioso del Poggio di natura calcareo-dolomitica. Nell'arenile orientale sfocia un fosso, il Vallone delle Fornaci che risulta attivo in termini sia di portata idraulica che di trasporto solido, soprattutto durante gli eventi di piena. Sin dalla sua realizzazione antecedente agli anni settanta, il porto ha subito diverse modifiche, per ovviare ad una serie di criticità. Tali modifiche hanno causato conseguenze ad entrambe le spiagge, di cui la più importante è l'accrescimento notevole della spiaggia di S. Domenico avvenuto recentemente. Subordinati, invece, almeno nella parte emersa i cambiamenti della spiaggia emersa di Lentiscelle di lunghezza di poco inferiore ai 900 m, delimitata fisicamente ad est dal Promontorio dello Zancale e ad ovest dallo sperone roccioso sopracitato, entrambi costituiti da dolomie cristalline in strati spessi e medi del Trias superiore. Lo sperone roccioso, essendo poco pronunciato, non impedisce alla spiaggia sommersa di Lentiscelle di ricevere apporti da ovest, ma soprattutto di avere interferenze con le strutture portuali (Fig. 11).

Figura 11. La spiaggia di Lentiscelle in inverno con un'aiuola utilizzata in estata per dividere le aree del parcheggio e quelle degli stabilimenti balneari.

L'area retrodunare della spiaggia di Lentiscelle è caratterizzata dalla presenza dapprima da depositi sabbiosi, subordinatamente ghiaiosi, con intercalazioni di livelli piroclastici e, a luoghi, resti di industrie litiche del Pleistocene medio-Olocene e quindi subito più a monte dai termini ruditici e calcarenitici del Pleistocene inferiore (Sintema di Lentiscosa). Quest'area è incisa da corsi d'acqua, che analogamente al Vallone già citato sembrano avere efficacia in coincidenza con eventi meteorici significativi. Forse ancor più della spiaggia de La Calanca, la parte retrostante della spiaggia di Lentiscelle è caratterizzata da un'area antropizzata con strutture turistiche, un campo sportivo e ben due strutture cimiteriali. Pertanto, le dune sono state fortemente alterate da interventi antropici, e ciò ha conseguenze sulla granulometria dei sedimenti, che risulta del tutto inappropriata (sabbie grossolane, decisamente poco classate e con curve fortemente asimmetriche). Sul resto della spiaggia emersa, larga mediamente sui 50 m, si può dire che essa potrebbe essere classificata come sabbiosa, anche se in battigia prevalgono termini grossolani fino a ghiaiosi. Anche gli altri parametri granulometrici risultano discordanti per una spiaggia con asimmetrie fini e classazione moderata. Invece, per quanto riguarda la spiaggia sommersa il decremento del granulo medio è graduale andando verso il largo. Come evidenziano le carte dei fondali marini dell'ISPRA si segnalano a poco meno di 20 m di profondità praterie di Fanerogame marine.

La tendenza evolutiva della spiaggia di Lentiscelle e di S. Domenico, come accennato, è fortemente influenzata dal porto di Marina di Camerota, nonché dalle piene del Vallone delle Fornaci che sfocia in questa baia. Osservando le linee di riva storiche si può constatare che la spiaggia di Lentiscelle ha subito delle rotazioni della linea di riva che hanno causato alle estremità della spiaggia delle variazioni di posizione dell'ordine di 10÷15 m. Tale comportamento sarebbe da imputare alla variabilità del moto ondoso che può risultare da anno in anno differentemente orientato. Nel trend delle linee di riva storiche è risultato mediamente stabile ad eccezione della zona posta a ridosso del nuovo sottoflutto.

In un ambito costiero così esteso e variegato sono state numerose le situazioni di criticità verificatesi e spesso sono state oggetto di atti di misure restrittive alla fruizione dei luoghi da parte degli Enti Competenti (Comuni, Capitaneria di Porto, Amministrazione Provinciale). Tali misure non hanno interessato solo le spiagge descritte, ma anche gli specchi d'acqua antistanti le falesie spesso frequentate da imbarcazioni. Sulle spiagge le mareggiate possono addirittura arrivare a sommergerle completamente, danneggiando, ad esempio, le strutture ed infrastrutture nell'entroterra, mentre sulle falesie i crolli e i ribaltamenti dei calcari o gli scorrimenti dei detriti sui pendii arenaceo-pelitici possono innescare condizioni di pericolosità severe e progressivamente estese. Tuttavia, non solo gli accadimenti improvvisi dovrebbero essere percepite come un pericolo, poiché anche il lento fenomeno erosivo è da porre sotto attenzione perché può diventare irreversibile, al punto da mettere in crisi l'economia di questo territorio.

Più specificamente, l'erosione della spiaggia de Le Saline che perdura da decenni costringe i titolari dei lidi e delle strutture ivi presenti ad effettuare ogni anno ripascimenti con mezzi meccanici. L'arretramento ha colpito soprattutto i tratti contigui alla "piastra" sia della spiaggia, sia della falesia (Lido Ficocella) scalzandola e danneggiando il tratto viario sovrastante (Fig. 12).

Figura 12. La frana verificatesi in seguito ad una mareggiata sulla falesia di Lido Ficocelle, contigua alla spiaggia de Le Saline.

Intervenire con delle strutture rigide parzialmente sommerse potrebbe essere una soluzione piuttosto coerente, tenuto conto della presenza della beachrock sia sulla spiaggia emersa che in quella sommersa. Tali strutture dovrebbero impedire soprattutto l'allontanamento verso il largo della frazione sabbiosa enfatizzato a sud della spiaggia. Un'ipotesi potrebbe essere rappresentata da una barriera sommersa intorno alla batimetrica di 5 m, integrata da un pennello parzialmente emerso da estendere trasversalmente in una porzione mediana della spiaggia.

Questo pennello eviterebbe di trasportare completamente le sabbie ad opera dalla corrente lungo costa verso sud e farebbe accrescere significativamente il tratto di spiaggia che si distende a nord. Si fa presente che la scogliera potrebbe collegarsi nella parte terminale con un pennello preesistente da riadattare (Fig. 13).

La scogliera, comunque, potrebbe continuare per un tratto, così da attenuare l'energia del moto ondoso sulla falesia costituita da sedimenti clastici, alquanto erodibili, presente in questo tratto. A queste strutture si dovrebbe associare un ripascimento, utilizzando verosimilmente sedimenti dalla cave di prestito sottomarine. I sedimenti di queste cave dovrebbero essere disponibili oltre la profondità di 8-9 metri, in cui la dinamica del moto ondoso è in grado di mobilizzare gli stessi. Non si deve altresì tralasciare il sedimento che soprattutto in coincidenza di eventi meteorici significativi giunge sulla parte superiore della spiaggia dai canali sottostanti la strada a monte della duna dissecandola profondamente. Il convogliamento di questo apporto per niente classato dovrebbe essere considerato ai fini della conservazione di quello che resta della duna.

Le condizioni della spiaggia di Cala del Cefalo, che si estende verso sud per oltre 3 km, oltre il promontorio

Figura 13. Pennello realizzato a ridosso della beachrock della spiaggia de Le Saline completamente inutile nella dinamica litoranea, ma riadattabile in un sistema integrato di difesa di questo tratto di costa.

di Palinuro, sono sicuramente da porre sotto attenzione, anche per l'elevato valore paesaggistico. Le criticità richiedono numerosi interventi, sia per i fenomeni erosivi a cui è soggetta la spiaggia sia per le minacce incombenti sulla duna e sulle aree sottostanti le falesie. Tali criticità devono tenere conto dell'uso massiccio della spiaggia per scopi balneari e della strada, che l'attraversa longitudinalmente, l'unica per raggiungere Marina di Camerota e il litorale limitrofo. Inoltre, è necessario ripensare il tratto di spiaggia sotteso dalla foce del fiume Mingardo, su cui già in passato inutilmente si era intervenuti mettendo in opera delle barriere sommerse. Praticamente, in questo tratto bisognerebbe impedire la forte aggressione del moto ondoso, che peraltro si ripercuote anche all'interno delle aree di foce, dove sono collocati degli insediamenti turistico-ricreativi. L'intervento potrebbe riprendere quanto già realizzato, risagomando quel che resta delle barriere e realizzando una scogliera radente all'esigua fascia sabbiosa. Questa ipotesi non solo consentirebbe la bonifica dell'immediato fondale, così da "rompere" correttamente l'avanzamento dell'onda, ma darebbe la possibilità di proteggere quello che è collocato a ridosso della costa. Utile sarebbe altresì impedire che la gran parte dell'apporto sedimentario del Mingardo si disperda al largo e venga "coinvolto" nel drift litoraneo diretto a sud. Tale apporto garantirebbe una maggiore stabilità della spiaggia emersa. Comunque, l'incremento dell'erosione soprattutto verso sud ha creato un marcato arretramento della linea di riva ed una minaccia seria alla duna litoranea e alla strada litoranea, spesso intaccata nel suo margine (Fig. 14a e 14b).

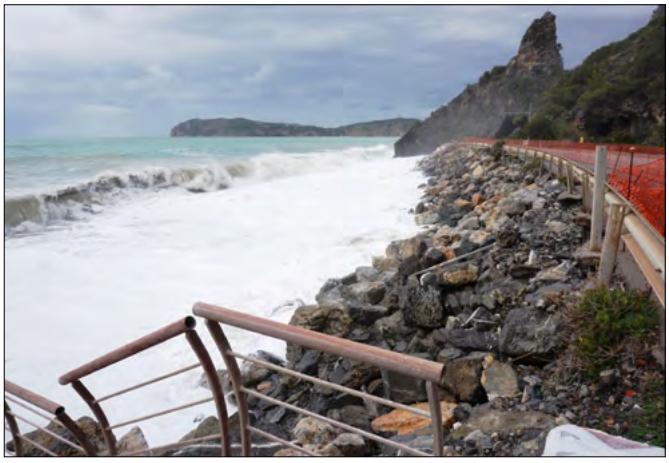


Figura 14a e 14b. Erosione della spiaggia di Cala del Cefalo a discapito della duna e della strada litoranea.

Figura 15. Interventi di conservazione della duna di Cala del Cefalo.

Ne è prova di questo tasso di arretramento gli speroni rocciosi che un tempo erano all'interno della spiaggia ora sono degradanti direttamente a mare. Proprio questi speroni potrebbero essere prolungati, a mo' di pennelli trasversali, così da impedire l'allontanamento dei sedimenti. A maggiore protezione della spiaggia, e conseguentemente della strada, ed evitare le correnti di risucchio, che in questa spiaggia possono di frequente innescarsi, si potrebbe realizzare una barriera sommersa. Analogamente alla spiaggia de Le Saline, ma forse in misura maggiore sarebbe utile procedere ad un ripascimento con sedimenti prelevati in cave di prestito sottomarine.

Probabilmente nell'area antistante la foce del fiume Mingardo potrebbero esserci ancora dei sedimenti aventi caratteristiche molto simili a quelle rinvenibili sulla spiaggia. In questo tratto di spiaggia possono essere ancora riconosciuti i resti di una duna costiera con una vegetazione psammofila ancora autoctona, seppure fortemente danneggiata. Purtroppo, questa condizione è stata causata dal gran numero di strutture impiantate per lo sviluppo turistico, che soltanto il progetto Life 3.0 dell'Unione Europea sulla "Conservazione delle dune costiere e degli ambienti dunali del Cilento" è riuscito a fermare. Attraverso tale progetto e al piano realizzato e sviluppato dall'Ente Parco Nazionale del Cilento, Vallo di Diano e Alburni è stata eseguita una recinzione per la difesa attiva degli habitat dunali, ricostituendolo nei suoi endemismi (Fig. 15).

Sulla spiaggia della Calanca sembra che la morfologia dei fondali sommersi influenzi pesantemente la stabilità di questa spiaggia da insenatura, determinando la dispersione delle sabbie al largo. Un'ipotesi potrebbe anche in questo caso realizzare una scogliera sommersa con la testata collegata alle falesie che delimitano questa spiaggia, anche per di attenuare l'azione aggressiva del moto ondoso incidente e limitando l'innesco delle correnti di risucchio. Per poter compensare la perdita di sedimento finora subita potrebbe essere recuperata della sabbia da tratti di fondali limitrofi per eseguire il ripascimento, previo una verifica della sua compatibilità.

Figura 16. Dissesti sullo sperone dolomitico de "Il Poggio" tra le spiagge di S.Domenico e Lentiscelle.

Infine, le spiagge nell'area sottoflutto del Porto di Marina di Camerota, che hanno sofferto in passato forti arretramenti, devono il loro apparente equilibrio proprio alla presenza delle strutture portuali, che hanno ridistribuito il sedimento verso di esse. Tuttavia, essendo evidenti delle criticità lateralmente allo sbocco del Vallone delle Fornaci ovvero in corrispondenza allo sperone dolomitico che grava sulla spiaggia di Lentiscelle soggetto a fenomeni di crollo, si dovranno realizzare interventi specifici su questi punti piuttosto che direttamente sulla spiaggia (Fig. 16).

In particolare, si dovrà si dovrà eseguire la ri-profilatura delle sponde del tratto terminale del corso d'acqua e la sistemazione della foce con un'idonea scogliera in massi naturali per proteggerla dal moto ondoso.

Questi interventi sono di salvaguardia, anche per i fenomeni di piena del vallone, che determinano frequenti allagamenti nelle aree limitrofe. Un ulteriore intervento andrà considerato per lo sperone roccioso che andrà sicuramente consolidato, per evitare dissesti alla strada sovrastante, e protetto alla base, per evitare fenomeni di scalzamento da parte delle onde.

In conclusione, se si riuscisse ad intervenire in modo idoneo ed efficace, integrando le conoscenze sugli aspetti naturalistici ed antropici, la costa del Cilento meridionale potrà continuare a rappresentare una meta non solo balneare (Valente *et al*., 2017; Guida e Valente, 2019; Valente *et al*., 2021). La tutela operata dal Geoparco del Cilento, Vallo di Diano e Alburni, infatti, garantisce non solo la conservazione di squarci naturalistici non ancora aggrediti dalle azioni dell'uomo, ma anche la gestione del territorio in modo corretto e coerente attraverso una pianificazione integrata.

Tuttavia, i cambiamenti, che si osservano, ad esempio, sulle spiagge, sono il risultato di interventi operati nel tempo sui bacini idrografici sottesi dalle coste ovvero sulle trasformazioni pesanti degli usi dei tratti litoranei per scopi turistico-balneari e non per ultimo dalle variazioni del livello del mare causato dal riscaldamento climatico globale. Solo il freno a questi cambiamenti potrebbe far invertire l'erosione delle spiagge, così da permettere ancora la disposizione di ombrelloni e sedie a sdraio e il piacere di godere di un paesaggio costiero sorprendente!

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Aloia A, De Vita A., Guida D, Toni A., Valente A. (2011). *La geodiversità del Parco Nazionale del Cilento e Vallo di Diano verso il Geoparco*. Atti del Convegno Nazionale: Il Patrimonio Geologico; una risorsa da proteggere e valorizzare (a cura di Mario Bentivenga), Sasso di Castalda (PZ), 29-30 aprile 2010, Geologia dell'Ambiente, suppl. n.2, 188-201

Guida D., Valente A., Valloni R., Aloia A. (2016). *Itinerario 13: Cilento meridionale*. In: Calcaterra D., D'Argenio B., Ferranti L., Pappone G., Petrosino P., Guide Geologiche Regionali, Campania e Molise, Società Geologica Italiana: Rome, Italy, 243-254.

D'Angelo S., Di Stefano F., Fiorentino A., Lettieri M.T., Russo G.F., Violante C. (2019). *Marine landscapes and habitats of Cilento Geopark (Italy) — linking geo — and biodiversity using a multiscalar approach*. In: Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat GeoHab Atlas of Seafloor Geomorphic Features and Benthic Habitats, P.T. Harris and E. Baker eds., Elsevier.

De Vita P., Carratù M.T., La Barbera G., Santoro S. (2013). *Kinematics and geological constraints of the slow-moving Pisciotta rock slide (southern Italy)*. Geomorphology, 201, 415–429.

De Vita A., Aloia A., Catino N., Marsicano A. (2013). *Cilento and Vallo di Diano Geopark*. In: Italian Geoparks, A. Aloia, M. Burlando, eds., Forum Nazionale Geoparchi Italiani: Salerno, Italia, pp. 46–51.

Esposito C., Filocamo F., Marciano R., Romano P., Santangelo N., Scarciglia F., Tuccimei P. (2003). *Late Quaternary shorelines in Southern Cilento (Mt. Bulgheria): Morphostratigraphy and chronology*. Il Quat. It J. Quater Sci., 16, 3–14.

GNRAC – Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero (2006). *Le spiagge della Campania* In: *Lo stato dei litorali italiani*. Studi Costieri, 10, 27-32.

Guida D., Valente A. (2019). *Terrestrial and marine landforms along the Cilento coastland (Southern Italy): A framework for landslide hazard assessment and environmental conservation*. WATER, 11 (12), 2618.

Guida D., Aloia A., Valente A. (2014). *Classification of the Cilento, Vallo di Diano and Alburni National Park–European Geopark Coastland*. In: Italian Geoparks, A. Aloia, M. Burlando, eds., Proceedings of the 7th International Conference on Environmental and Geological Science and Engineering, Salerno, Italy, 3–5 June 2014; pp. 121–126.

ISPRA (2013). *Geological Map and Submerged Landscape Map of the National Park of Cilento, Vallo di Diano and Alburni*. ISPRA: Rome, Italy.

Regione Campania (2007). *Piano Stralcio per la Difesa Costiera*. Disponibile online: http://www.adbsxsele.it.

Valente A., Magliulo P., Russo F. (2017). *The Coastal Landscape of Cilento (Southern Italy): A Challenge for Protection and Tourism Valorisation*. In: Landscape and Landforms of Italy, M. Soldati and M. Marchetti eds., Springer, 35, pp. 409–419.

Valente A, Monaco M, Peduto F. (2013). *Coastal erosion processes: the case study of the Cala del Cefalo beach (Cilento and Vallo di Diano Geopark, southern Italy)*. Rend. online Soc. Geol It., vol. 28, p. 142-145.

Valente E., Casaburi A., Finizio M., Papaleo L., Sorrentino A., Santangelo N. (2021). *Defining the Geotourism Potential of the CILENTO, Vallo di Diano and Alburni UNESCO Global Geopark (Southern Italy)*. Geosciences 2021, 11, 466.

Vitale S., Ciarcia S., Fedele L., Tramparulo F.D. (2019). *The Ligurian oceanic successions in southern Italy: The key to decrypting the first orogenic stages of the southern Apennines-Calabria chain system*. Tectonophysics, 750, 243–261.

I Geositi costieri marchigiani, grande opportunità e grande vulnerabilità: una proposta per la valorizzazione e la promozione del Patrimonio Geologico

The geosites of the Marche coast, great opportunity and great vulnerability: a proposal for the enhancement and promotion of the Geoheritage

Laura Valentini
Dipartimento di Scienze Biomolecolari, Università di Urbino Carlo Bo, Campus Scientifico Enrico Mattei

E-mail: laura.valentini@uniurb.it

Parole chiave: geosito, costa marchigiana, vulnerabilità, geoconservazione, patrimonio geologico
Key words: geosite, Marche coastline, vulnerability, geoconservation, geoheritage

1. INTRODUZIONE

Una recente iniziativa del Gruppo di Lavoro costituito da SIGEA Marche, Ordine dei Geologi delle Marche e Università di Urbino e Camerino, ha visto l'organizzazione in data 26 maggio 2022 ad Ancona del *Workshop* nazionale intitolato "I geositi delle Marche. Un patrimonio di geodiversità di eccezionale valore", intendendo con questo termine anche i siti di interesse geomorfologico, già denominati da Panizza (2001) come geomorfositi.

Durante il *workshop* il Gruppo di Lavoro ha portato all'attenzione degli Enti e degli Amministratori Regionali il tema dei Geositi e della Geodiversità, attraverso la presentazione di un fondamentale atto amministrativo, con l'obiettivo di porre le basi per la presentazione di un disegno di legge regionale volto alla tutela e valorizzazione di un bene straordinario.

L'atto presentato nel *Worhshop* propone un censimento dei numerosi e straordinari geositi marchigiani, corredato da una serie di informazioni sui luoghi, la loro geolocalizzazione e schede illustrative contenenti immagini, notizie geologiche, geomorfologiche, naturalistiche e culturali oltre a proposte di itinerari geo-turistici (Alessandroni *et al*., in stampa). Nelle schede viene inoltre affrontata una valutazione qualitativa del valore scientifico e dei valori addizionali che caratterizzano ciascun sito. Al momento l'elenco contiene 197 geositi, numero che potrà essere certamente in seguito implementato, distribuiti in tutta la Regione e distinti in due tipologie: geositi puntuali ed areali, dove per geosito areale si intende uno spazio in cui sono identificabili e differenziabili almeno due geositi puntuali interni.

All'elenco è stata allegata una proposta di legge regionale concernente le "Norme per la conservazione e la valorizzazione dei geositi e della geodiversità delle Marche e delle attività connesse".

L'obiettivo è quello di contribuire a censire, valorizzare, salvaguardare e promuovere i geositi del territorio marchigiano, caratterizzato da contesti fisico-ambientali di singolare geodiversità e biodiversità, di eccezionale valore scientifico, culturale ed ambientale ed è rivolto alla promulgazione di una legge regionale sul settore specifico.

Le Marche sono una regione che vanta una notevole geodiversità: una molteplicità di paesaggi accompagnata da una grande varietà microclimatica, floristica e faunistica, che ha condizionato gli insediamenti umani, la storia e la cultura. Una ricchezza, tuttavia, non del tutto consapevole, poiché manca agli utenti una approfondita "conoscenza" del territorio (intendendo con questo termine gli aspetti genetici ed evolutivi, per risalire ai punti di forza ma anche le fragilità), un aspetto che sta alla base dell'attaccamento che l'uomo può sviluppare verso un luogo e verso il desiderio di conservarlo.

I Geositi sono luoghi che testimoniano gli eventi geologici e geomorfologici del nostro pianeta, rappresentando l'anello di congiunzione tra le componenti fisiche del territorio e le componenti biologiche e antropiche. Sono luoghi fondamentali per la promozione del territorio, con riflessi sulle attività educative, formative, di turismo culturale e ricreative e come tali rappresentano una grande ricchezza, che è necessario comprendere perché possa essere valorizzata, protetta e conservata.

Fra i numerosi geositi investigati dal Gruppo di Lavoro, vengono proposti in questo ambito i più spettacolari appartenenti alla fascia costiera: Il Monte San Bartolo, Il Colle Ardizio, Il Monte Cònero e la costa alta di Pedaso.

Infine, è davvero importante la scelta di un metodo di sensibilizzazione e di divulgazione del patrimonio geologico, che si riveli capace di rendere facilmente comprensibili e accessibili ad un pubblico ampio le principali problematiche scientifiche di questi luoghi.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

L'area nord-marchigiana è morfologicamente caratterizzata dall'alternanza di rilievi e depressioni allungati in direzione appenninica (NW-SE), in genere coincidenti rispettivamente con anticlinali e sinclinali. La morfologia dei versanti ad orientazione appenninica riflette solitamente la giacitura media degli strati e le principali dislocazioni tettoniche. La presenza di formazioni più facilmente degradabili (Marne a Fucoidi, Scaglia Cinerea, ecc.), intercalate a formazioni più

resistenti, prevalentemente calcaree, ha favorito il modellamento di rilievi con sommità arrotondate e/o appiattite.

La successione umbro-marchigiana consiste in una sequenza di rocce sedimentarie depositate in Italia centrale dal periodo Giurassico (a partire da circa 200 milioni di anni fa) fino al Pleistocene. Essa rappresenta il principale documento per ricostruire la storia geologica della regione: per le sue caratteristiche di completezza e continuità è una delle serie stratigrafiche più studiate a livello mondiale (Barchi *et al*., 2012; Alvarez, 2019 e bibliografia ivi citata).

In Fig. 1 è riportata uno *sketch* geologico che accorpa in tre grandi gruppi le formazioni della successione umbro-marchigiana:

- Le formazioni che vanno dal Giurassico al Paleocene delle dorsali carbonatiche
- Le formazioni marnoso-calcaree, terrigene ed evaporitiche dell'Eocene-Miocene
- Le formazioni marine del Plio-Pleistocene

Il settore più settentrionale dell'area è interessato dalle formazioni della cosiddetta Coltre della Valmarecchia, provenienti dal bacino ligure-piemontese ed accavallate in estese falde sui terreni umbro-marchigiani, attraverso meccanismi sia tettonici che gravitativi. Il forte contrasto litologico, tra il substrato prevalentemente argilloso e le "zattere" prevalentemente calcaree più rigide, ha contribuito a determinare un paesaggio unico ed affascinante ma, allo stesso tempo, fragile e instabile.

Schematizzando, nel bacino umbro-marchigiano si individua una sequenza basale, non affiorante, riferibile ad un ambiente evaporitico di acqua bassa (Trias sup.), una sequenza centrale di ambiente pelagico (Giurassico medio - Eocene), ed una superiore di tipo torbiditico (Oligocene sup. – Miocene sup.).

Dalla fine del Lias inferiore, in relazione a una fase tettonica distensiva, la piattaforma si frattura in diversi blocchi, con la formazione di horst e graben. Termina la sedimentazione di mare basso ed inizia la lunga sedimentazione pelagica, che va a livellare la fisiografia precedente. Nei bacini più profondi si ha la deposizione di un notevole spessore di sedimenti (successione completa), mentre nei rilievi, caratterizzati da acque basse, la sedimentazione presenta spessori più ridotti (successione condensata) e lacune variamente estese nel tempo (successione lacunosa).

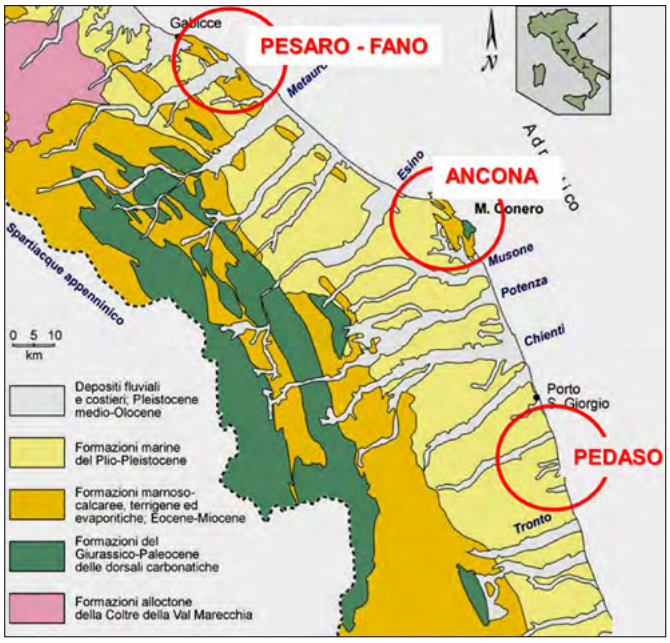


FIGURA 1. Sketch geologico semplificato delle formazioni della successione umbro-marchigiana.

Il sollevamento della catena appenninica, avviatosi nel Miocene, è legato allo scontro fra la porzione più settentrionale della placca africana con la placca eurasiatica. Il territorio marchigiano incomincia ad acquisire l'assetto geomorfologico attuale proprio a partire dalla seconda metà del Miocene, approssimativamente fra 13 e 5 milioni di anni fa, con la strutturazione della catena appenninica e la sua emersione. Il sollevamento avviene in concomitanza del forte corrugamento della crosta terrestre, caratterizzato dalla formazione di ampie pieghe variamente associate a grandi sistemi di faglie. Sotto l'azione delle spinte tettoniche, orientate principalmente verso NE, si ha dapprima il sollevamento della porzione più occidentale dell'appennino, corrispondente alla dorsale Umbro-Marchigiana, e successivamente dei settori più orientali, corrispondenti alla dorsale Marchigiana e alla fascia pedemontana.

Il progressivo estendersi del sollevamento verso est determina il collasso delle aree più interne, che si manifesta con faglie normali a direzione appenninica, le quali dislocano le precedenti strutture compressive determinando una serie di blocchi ribassati verso SW. Si formano in questo modo le depressioni tettoniche di Colfiorito, Norcia, Castelluccio bordate sul lato orientale da faglie normali la cui attività recente è testimoniata da numerosi terremoti che hanno causato la distruzione di un patrimonio culturale e umano inestimabile.

I principali fiumi marchigiani scorrono generalmente verso NE, tagliando così ortogonalmente le principali strutture geologiche e le corrispondenti morfo-strutture che caratterizzano l'Appennino marchigiano (Mayer *et al*., 2003). Il reticolo idrografico marchigiano, che alla scala regionale può essere descritto come una serie di fiumi disposti "a pettine" che sfociano in Adriatico, è ascrivibile al tipo (o pattern) parallelo/subparallelo, andamento controllato principalmente dal pendio regionale prodotto dal lento sollevarsi della catena, via via più antico e accentuato nelle aree interne. I fiumi appenninici, nel loro cammino verso l'Adriatico, tagliano trasversalmente le maggiori dorsali anticlinaliche, incidendo profonde gole.

La progressiva deformazione e l'emersione della catena proseguono fino al Quaternario, e contemporaneamente il territorio viene sottoposto al modellamento da parte degli agenti esogeni su lito-strutture assai differenti (Coltorti *et al*., 1996), producendo l'articolato e suggestivo scenario attuale, caratterizzato da una straordinaria geodiversità.

L'evoluzione della costa marchigiana ha subito nel tempo notevoli e radicali mutamenti. Durante il Quaternario il livello marino è molto variato, specialmente in relazione alle grandi oscillazioni glaciali-interglaciali del Pleistocene medio-superiore. Durante l'ultimo pleniglaciale (circa 18.000 anni fa) il bacino adriatico era parzialmente emerso e costituiva il prolungamento della pianura padana. La costa era ubicata circa all'altezza di Pescara e delimitava una vasta pianura

alluvionale, percorsa dal Po e dai suoi affluenti: i corsi d'acqua veneti, romagnoli e marchigiani. I rilievi di Monte San Bartolo, Colle Ardizio e del Monte Cònero erano decisamente più sviluppati, ma ogni volta che il mare avanzava durante le fasi interglaciali, essi subivano un nuovo arretramento.

Nell'Olocene, infine, questi promontori che si protendevano nettamente verso mare sono stati sottoposti ad attiva erosione marina. Circa 2.000 anni fa la morfologia della costa nord-marchigiana era indubbiamente più articolata: nei tratti pianeggianti corrispondenti alle piane alluvionali dei fiumi la linea di riva era arretrata di 200-800 m rispetto all'attuale e in corrispondenza delle attuali aree di foce si aprivano ampi golfi.

3. IL PATRIMONIO MARCHIGIANO COSTIERO

La fascia costiera marchigiana costituisce un'unità morfodinamica complessa, formata da settori con problematiche assai diverse dal punto di vista morfologico ed evolutivo (Elmi *et al*., 2002; 2003; Ginesu 2011; Savelli *et al*., 2017). La linea di costa è prevalentemente rettilinea e si sviluppa per circa 172 km con un andamento NO-SE tra Pesaro ed Ancona e NNO-SSE tra Ancona e Pedaso (Fig. 1).

Il litorale è costituito in prevalenza da coste basse, coprendo una lunghezza di circa 144 km: le più ampie corrispondono alle piane alluvionali dei fiumi, mentre fasce più strette sono alla base delle falesie arretrate, parallele alla linea di riva attuale.

Le coste alte marchigiane si sviluppano per un tratto complessivo di 28 km, e sono rappresentate dalle falesie dei rilievi del Monte San Bartolo e del Colle Ardizio al nord, del Monte Cònero al centro, e di Pedaso al sud. Esse, oltre ad essere luoghi estremamente significativi dal punto di vista morfologico, espongono sequenze litostratigrafiche che ci raccontano la storia geologica di queste aree. Le unità più antiche affioranti nei rilievi del San Bartolo e dell'Ardizio risalgono al Miocene medio-superiore, nel Monte Cònero il nucleo della struttura è rappresentata da formazioni cretaciche, mentre la falesia di Pedaso è costituita da corpi sabbioso-conglomeratici pleistocenici.

Le morfologie che oggi osserviamo sono anche il risultato dei cambiamenti climatici e tettonici avvenuti nel Quaternario. La dinamicità spazio-temporale che caratterizza ognuno di questi luoghi è comprensibile solo dopo uno studio approfondito della loro genesi ed evoluzione, e solo in questo modo si può avere l'opportunità di associare l'effetto scenografico ed estetico con il loro valore più nascosto.

Si presentano qui, mettendoli a confronto, 4 geositi costieri marchigiani riferibili ai 4 rilievi costieri sopracitati di Monte San Bartolo e Colle Ardizio (tratto Pesaro-Fano), Monte Cònero (in prossimità di Ancona) e costa alta di Pedaso (in località Torre di Palme), caratterizzati da contesti di straordinario impatto visivo, geodiversità e biodiversità.

La morfologia di questi luoghi ha offerto all'uomo posizioni di privilegio e di controllo sul mare, influenzando la storia e la cultura di queste terre e più recentemente anche le attività turistiche ed economiche.

3.1 Il Monte San Bartolo

Ci troviamo nel settore più settentrionale del litorale marchigiano, caratterizzato da una costa alta e rocciosa. La falesia costiera di Monte San Bartolo (Fig. 2), alta più di 200 metri e a picco sul mare, rappresenta la dorsale più esterna della catena appenninica che si prolunga fino all'Adriatico. Le sabbie e le marne mioceniche che formano l'ossatura del promontorio emergono repentinamente interrompendo il paesaggio costiero, piatto e monotono, della più settentrionale pianura romagnola.

Figura 2. La falesia costiera di Monte San Bartolo, Marche settentrionali.

FIGURA 3. La falesia attaccata dalle onde durante le mareggiate.

FIGURA 4. Testimonianza di fenomeni franosi in prossimità dell'abitato di Fiorenzuola di Focara.

Le piccole e sporadiche spiagge ghiaiose e ciottolose che proteggono la base del rilievo vengono facilmente rimosse e superate dalle onde durante le mareggiate più forti. I costoni rocciosi meno protetti sono invece direttamente attaccati dalle onde (Fig. 3).

Per questo motivo, ma anche a causa della litologia facilmente erodibile e della fratturazione delle rocce, il versante a mare è interessato da estesi movimenti franosi che mettono in pericolo i sovrastanti abitati di Gabicce Monte, Casteldimezzo, Fiorenzuola di Focara, Santa Marina Alta e parte della strada panoramica (Fig. 4).

Alle cause naturali dell'instabilità del monte si sovrappongono quelle antropiche: l'uomo infatti è intervenuto pesantemente a disturbare il precario equilibrio e ad accelerare i processi di erosione. Una delle cause più importanti dell'erosione costiera è la diminuzione dell'apporto sedimentario da parte dei fiumi Foglia e Metauro che sfociano a sud-est del rilievo. È proprio il carico solido di questi fiumi che contribuisce ad alimentare le spiagge pesaresi in quanto le correnti litoranee trasportano il sedimento verso nord. La portata solida dei fiumi è notevolmente diminuita a causa della costruzione delle dighe e anche a causa della estrazione di inerti sugli alvei. Per arrestare l'avanzata del mare e ridurre il rischio delle abitazioni che sorgono sulla falesia nonché della strada provinciale, si sono costruite scogliere foranee che, pur decelerando il processo, non hanno risolto il problema dell'erosione del rilievo e peraltro corrotto la sua selvaggia bellezza (Fig. 5). La risposta del sistema costiero è stata la innaturale formazione di spiagge sabbiose tra le scogliere e la linea di riva e l'innesco di complessi processi

FIGURA 5. La falesia del San Bartolo e le scogliere foranee.

Figura 6. Il Colle Ardizio e la falesia relitta.

di rifrazione e diffrazione del moto ondoso sulle strutture foranee che determina pericolose correnti litoranee (Colantoni *et al*., 2004).

L'arretramento di questo tratto, come in tutta la costa adriatica, è stato veloce e continuo fin dall'Olocene (11.000 anni fa) e la linea di riva è mutata continuamente nel tempo. Le paleo-coste sono ormai cancellate anche se esistono inconfondibili testimonianze geomorfologiche della loro esistenza nella antistante parte sommersa. La superficie di abrasione che si osserva in determinati giorni quando il mare è calmo e limpido, ci dà la misura dell'arretramento del rilievo, stimato mediamente in 35 cm all'anno! Dati geomorfologici testimoniano che circa 6000 anni fa la costa era avanzata rispetto all'attuale di circa due chilometri e il rilievo del San Bartolo era molto più esteso e proteso verso il mare. (Coccioni, 2003).

L'aspetto più significativo di questo geosito, a parte la sua peculiarità di essere il primo tratto di costa alta scendendo da nord e il suo indubbio valore paesaggistico e scenografico, è quello didattico. Escursioni mirate a comprendere l'evoluzione delle coste alte, i fenomeni franosi causati dal moto ondoso, le importanti località fossilifere come il Monte Castellaro, ma anche itinerari naturalistici sulle varie specie botaniche e faunistiche, ne fanno un luogo in cui la bellezza del paesaggio si somma agli aspetti scientifici, naturalistici, storici e archeologici.

3.2 Il Colle Ardizio

Il Colle Ardizio è un rilievo dalla forma allungata che si affaccia sul mare Adriatico tra Pesaro e Fano. Prende il nome dal Monte Ardizio che con i suoi 139 m s.l.m. costituisce la punta più alta dell'intero promontorio.

Dal punto di vista geomorfologico si tratta di una falesia costiera separata dal mare da un'ampia fascia sabbiosa, sulla quale corre attualmente sia la strada nazionale che la ferrovia costruita nel 1861. Non essendo attualmente intaccata dal mare non è più soggetta all'erosione da parte del moto ondoso, si tratta quindi di una falesia inattiva, o relitta (Fig. 6). La morfologia che caratterizza questo settore della costa marchigiana costituisce un patrimonio di grande valore naturalistico, culturale e scientifico anche se l'eccessiva antropizzazione dell'area ha purtroppo portato alla sua snaturalizzazione. Dalla seconda metà del Novecento la fascia sabbiosa si è fortemente degradata a causa dell'erosione costiera e dell'intensificarsi del dissesto nel versante a mare del Colle Ardizio (Coccioni, 2005).

Dal punto di vista geologico l'area fa parte, come il vicino Monte San Bartolo, dell'anticlinale esterna nord-marchigiana il cui fianco a mare è stato completamente smantellato dall'erosione costiera. Le rocce che compongono il Colle Ardizio sono arenarie e, subordinatamente, argille appartenenti alla *Formazione a Colombacci* del Miocene superiore. La formazione in oggetto è ben visibile sulla falesia subverticale dove affiora la tipica alternanza ritmica di strati arenitici di colore ocraceo-giallastro e sottili strati argillosi grigiastri. Verso l'alto, le arenarie diventano predominanti e sono caratterizzate da banconi anche di spessore metrico (Fig. 7).

Figura 7. Strati e banconi arenitici affioranti lungo la falesia del Colle Ardizio.

Tutta l'area costiera tra Pesaro e Fano ha assunto nel suo passato geologico forme molto diverse. Di grande interesse per la ricostruzione genetica dell'area, è stato il ritrovamento, sulla sua sommità, di un affioramento di ciottoli fluviali appartenenti al bacino del Fiume Metauro (Fig. 8), che attualmente si trova distante dal sito una decina di chilometri (Nesci, 1981). Il rinvenimento testimonia che nel Pleistocene medio (circa 350.000 anni fa) l'area faceva parte della pianura alluvionale del Fiume Metauro e che il successivo sollevamento ha smembrato la grande superficie determinando la separazione tra i bacini dei fiumi Foglia, Arzilla e Metauro.

FIGURA 8. Ciottoli di un antico terrazzo fluviale appartenente al bacino del Fiume Metauro.

Durante l'ultimo pleniglaciale (circa 20.000 anni fa), la riva era molto più avanzata e l'Ardizio era un rilievo molto esteso e ben lontano dalla costa adriatica, che era ubicata all'altezza di Pescara. Il promontorio si ergeva invece sulla grande piana alluvionale del fiume Po che scorreva nella depressione medio adriatica. Durante la successiva fase di innalzamento termico globale, l'Adriatico, come tutti i mari e oceani del mondo, avanzò fino a giungere ad aggredire il rilievo che venne parzialmente eroso e portato all'attuale conformazione.

In epoca romana il promontorio era un frequentato luogo di passaggio, in quanto attraversato dalla via Flaminia che da Fano, con un'ampia curva, saliva sul rilievo (Dall'Aglio e Nesci, 2013), poiché il mare lambiva tutta la falesia costiera.

Il grande alluvionamento e quindi la formazione della fascia sabbiosa costiera alla base del colle risale al periodo medievale a causa di mutate condizioni climatiche. Le ripe d'erosione marina a diretto contatto con il mare si trasformarono in falesie relitte e sulla cimosa costiera furono edificati porti e strade. Successivamente, le linee di riva avanzarono e si ritirarono più volte in relazione ai cambiamenti climatici, che influenzavano il trasporto solido dei fiumi e la distribuzione della vegetazione. L'intervento umano, con la costruzione di dighe sugli alvei fluviali e la conseguente diminuzione dell'apporto solido, ha prodotto pesanti ed estese conseguenze su tutto il litorale. Gli effetti dei moli portuali sono locali e relativamente circoscritti, la messa in posto delle scogliere (Fig. 9) ha prodotto limitate (anche

FIGURA 9. Panoramica sulla costa dalla sommità del Colle Ardizio.

Figura 10. Panoramica sulla spiaggia di Mezzavalle e il Monte dei Corvi.

se significative per il turismo balneare) migrazioni della spiaggia sia emersa che sommersa, con tuttavia un notevole impatto visivo (Coccioni, 2005).

3.3 Il Monte Cònero

Nelle Marche centrali, poco sotto Ancona, si estende una delle aree costiere più belle d'Italia: il promontorio del Monte Cònero. Per il suo indiscutibile valore paesaggistico e naturalistico, questo tratto di costa è dal 1987 sede di un Parco Regionale, un'oasi di macchia mediterranea che si protende sul mare raggiungendo i 512 m s.l.m., ricca di sentieri, insenature rocciose e incantevoli spiagge. Il promontorio del Monte Cònero costituisce il rilievo calcareo più esterno dell'Appennino centro settentrionale (Savelli *et al*., 2017). Si tratta di una struttura anticlinalica fortemente asimmetrica con asse orientato in direzione appenninica e vergenza NE, ove affiora la successione stratigrafica umbro-marchigiana dalla Maiolica ai depositi plio-pleistocenici (Passeri, 1994). L'evoluzione quaternaria del Monte Cònero e del tratto di costa che arriva fino ad Ancona è simile a quella di tutte le coste alte marchigiane (Monte San Bartolo, Colle Ardizio, Pedaso). Il promontorio ha infatti risentito delle variazioni climatiche quaternarie e del conseguente arretramento e avanzamento della linea di costa. Il tratto che va dalla spiaggia di Mezzavalle a Monte dei Corvi (Fig. 10) è costituito da una successione di rocce sedimentarie rappresentate essenzialmente da marne e calcari che

Figura 11. L'orizzonte del Trave.

Figura 12. Gessoareniti di età messiniana affioranti alla base della falesia.

segnano la transizione dal Miocene (punto più occidentale della falesia di Monte di Corvi) al Pliocene (spiaggia di Mezzavalle).

A causa della presenza di strati resistenti come calcari ed arenarie, meno erodibili rispetto alle adiacenti marne e argille, la falesia costiera è arretrata in maniera differenziata. Gli strati più resistenti costituiscono una sorta di barriere naturali che contrastano l'azione erosiva del mare e controllano la formazione della spiaggia ghiaiosa. La barriera naturale più caratteristica e scenografica è lo "Scoglio del Trave" costituito da un orizzonte ben cementato e compatto che, scendendo lungo il versante meridionale del Monte dei Corvi, si protende isolato in mare per circa 450 m (Fig. 11). Geologicamente rappresenta la parte sommitale del Miocene ed è costituito da una fitta alternanza di strati arenacei e marnoso-calcareo con spessore totale di circa 14 m. Questo spessore si assottiglia procedendo verso nord-ovest, fino a scomparire completamente nei dintorni di Ancona. Il colore d'insieme della roccia fresca è il grigio scuro ma, per effetto dell'alterazione superficiale, esso diviene giallo-ocra, con tonalità più scure nei cinque metri sommitali a causa della prevalenza di livelli arenacei. Sull'orizzonte del Trave poggiano le marne argillose e siltose del Pliocene inferiore.

Poche centinaia di metri più a sud del Trave, alla base della falesia, è presente un affioramento che attira l'attenzione per la sua lucentezza. Si tratta delle gessoareniti di età messiniana (Fig. 12), importanti testimoni della crisi di salinità mediterranea (si tratta infatti di rocce evaporitiche che derivano da cristallizzazioni in acque poco profonde), in contatto tettonico per faglia con le marne argillose plioceniche.

La presenza di rocce marnose e argillose poco resistenti all'erosione ha determinato l'ampia rientranza morfologica alla quale corrisponde la spiaggia di Mezzavalle. La falesia è bordata alla base da una spiaggia ghiaiosa alimentata prevalentemente dalle rocce carbonatiche provenienti dal Monte Cònero. Lo "Scoglio del Trave" rappresenta un raro esempio di molo naturale; sulla parte iniziale si scorge una piccola costruzione in muratura che veniva adoperata dai pescatori, il Casotto Fattorini, oggi in totale stato di degrado. Questo geosito non è noto solo per il suo fascino ma anche per la sua valenza ambientale. Infatti, alla presenza del molo naturale si deve l'esistenza della spiaggia di Mezzavalle i cui sedimenti, trasportati dalle correnti parallele alla riva da sud verso nord, si fermano nella baia a ridosso dello scoglio.

L'intera scarpata che borda la spiaggia di Mezzavalle è soggetta a frequenti fenomeni franosi che possono creare situazioni di rischio per chi transita per motivi balneari o escursionistici; il tratto costiero che dalla spiaggia conduce al Trave è scomodo e scivoloso con il mare calmo ma diventa assolutamente non percorribile durante le mareggiate.

Le spiaggette del Cònero sono alimentate dalle falesie e dalle scarpate adiacenti. Non essendo alimentate dai fiumi non risentono della diminuzione dell'apporto sedimentario dei maggiori corsi d'acqua marchigiani.

L'intero versante retrostante Portonovo costituisce un'area fortemente instabile. La morfologia prominente sul mare è legata ad un imponente evento franoso attivatosi in più fasi (Fig. 13). Sulla superficie dell'accumulo si trovano due laghetti salmastri, il prodotto dell'erosione operata dal moto ondoso sul corpo di frana (Aringoli *et al*., 2014; Montanari *et al*., 2016; Savelli *et al*., 2017; Troiani *et al*., 2020).

Figura 13. Portonovo: sul lato destro del promontorio è chiaramente visibile l'imponente corpo di frana (da Google Earth).

3.4 La costa alta di Pedaso: Torre di Palme

L'area costiera che si estende dal Monte Cònero alla foce del fiume Tronto è caratterizzata da una morfologia piuttosto dolce che la differenzia dalla più articolata costa marchigiana settentrionale. Le formazioni geologiche di età più recente e strutturalmente meno complesse conferiscono al paesaggio un aspetto più regolare costituito da lembi di superfici leggermente degradanti verso il mare incise da una serie di corsi d'acqua (Fig. 14) disposti a ventaglio (reticolo divergente). Proprio su uno di questi lembi, in posizione dominante sulla costa e sul mare Adriatico, è situata Torre di Palme, un incantevole borgo medievale (Fig. 15).

Dal punto di vista geologico l'intera area è caratterizzata da depositi marini argillosi, appartenenti all'Emiliano (Pleistocene inferiore, 1.3-1.0 Ma), ricoperti da sabbie e ghiaie litorali del Siciliano (Pleistocene medio, 0.8 Ma), a loro volta ricoperti da ghiaie continentali attribuibili al Siciliano-Crotoniano (circa 0.5 Ma).

Figura 14. Immagine tratta da Google Earth della fascia costiera in prossimità di Torre di Palme.

Figura 15. Il borgo medioevale di Torre di Palme sulla falesia.

Figura 16. Ghiaie continentali affioranti sotto l'abitato di Torre di Palme.

Sono proprio questi ultimi depositi ghiaiosi a determinare la morfologia dell'area in quanto appartengono ad ampie conoidi continentali (Fig. 16) provenienti dall'area montana e depositate da un paleo-reticolo ormai scomparso.

Questo particolare tipo di drenaggio fluviale si ritrova attualmente nelle aree caratterizzate da grandi conoidi. Se la conoide diventa inattiva, a causa di un sollevamento dell'area o per mutate condizioni climatiche, i canali fluviali su di essa cominceranno ad incidere la superficie senza modificare il loro corso, mantenendo le caratteristiche morfologiche del reticolo divergente preesistente (Nesci e Savelli, 2003).

Analogo comportamento si è verificato nei settori costieri dei fiumi marchigiani meridionali i cui spartiacque corrispondono alla superficie sommitale delle conoidi. Queste ultime, verso mare, sono troncate da ripide falesie modellatesi a causa dei ripetuti avanzamenti e regressioni della linea di riva. Si sono formate così caratteristiche coste alte, una volta attive ma ora bordate dal lungo litorale sabbioso olocenico.

Questa posizione elevata (Fig. 17) ha favorito nella storia recente la colonizzazione umana delle superfici costiere, sia per motivi di difesa che di controllo sul mare. Da questi punti panoramici, infatti, si può avvistare gran parte del settore costiero e ciò ne fa un luogo privilegiato, oggi anche dal punto di vista turistico.

4. UN APPROCCIO PER LA VALORIZZAZIONE E LA PROMOZIONE DEL GEOHERITAGE

I Geositi sono la testimonianza dei complessi eventi geologici e geomorfologici che hanno caratterizzato la storia e l'evoluzione di una porzione della nostra Terra, e contribuito a definire i suoi paesaggi e, come tali, devono essere valorizzati e preservati (Wimbledon, 1996; Grandgirard, 1997; 1999). Le caratteristiche di un geosito possono essere molto preziose per valorizzare e promuovere il territorio, con positivi riflessi sulle attività educative, formative, di turismo culturale e ricreative.

Ma in che modo è possibile sviluppare un metodo capace di promuovere e valorizzare il patrimonio geologico, senza ricadere in qualcosa di "troppo specialistico", riserva-

Figura 17. Uno scorcio sul mare da Torre di Palme.

to ai soli "addetti ai lavori"? La Geomorfologia culturale, una scienza che studia i caratteri geomorfologici del territorio considerando sia il valore scientifico del paesaggio che le sue interazioni con il contesto antropico, storico e culturale, ci può fornire la giusta chiave di lettura. Il valore scientifico, legato alla rarità, la rappresentatività, l'integrità, la diversità e la conoscenza scientifica di un luogo, è il fattore fondamentale per la valutazione del geosito, a cui vanno connessi i cosiddetti valori aggiuntivi, il valore culturale, ecologico ed estetico, e infine quei fattori che riguardano la possibilità di gestione e di fruizione, quali l'accessibilità, la visibilità e la vulnerabilità (Pereira e Pereira, 2010).

Nella consapevolezza che la vulnerabilità di un luogo è legata sia a fenomeni naturali che antropici, poiché la promozione del geoheritage ha fra i suoi principali obiettivi quello divulgativo ed educativo, si ritiene estremamente importante la scelta di un metodo comunicativo efficace: un metodo capace non solo di trasmettere il valore e la bellezza di un luogo, ma anche di coinvolgere le persone in modo diretto, stimolando nel visitatore il desiderio di proteggere e preservare quella ricchezza che caratterizza e valorizza un territorio.

Proprio in questa direzione, con l'intento di comunicare contenuti scientifici anche complessi ad un pubblico ampio e non specialista, opera un gruppo di artisti e scienziati marchigiani: *TerreRare*.

Il gruppo è attivo da oltre dieci anni, promuovendo il territorio marchigiano attraverso un linguaggio in cui la scienza si affianca all'arte, per mezzo di spettacoli dal vivo, conferenze divulgative, convegni, comunicazione attraverso i social, escursioni a tema, sondaggi on-line e sondaggi post-escursione.

Che l'arte possa rappresentare un efficace mezzo di veicolazione di importanti contenuti è cosa nota fin dall'antichità. Anche in ambito scientifico la collaborazione fra scienziati e artisti si sta dimostrando sempre più apprezzata e fruttuosa. Da questa convinzione e dall'amore per il territorio è iniziato un progetto di promozione del geoheritage, attraverso un percorso di sensibilizzazione della gente comune, non solo degli specialisti (e qui l'arte gioca un ruolo fondamentale), con il fine ultimo di educare al paesaggio, un bene straordinario da conoscere, proteggere e preservare per le generazioni future.

Figura 18. Immagini tratte da uno spettacolo del gruppo *TerreRare* avvenuto in data 20 ottobre 2019 nella Chiesa di Santa Maria di Portonovo.

Figura 19. Immagini tratte da escursioni a tema, con esecuzioni di musica e letture di poesie dal vivo, nell'ambito del progetto *Paesaggeo*.

TerreRare ha prodotto pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali (Nesci e Valentini, 2020; Valentini e Nesci, 2021; Valentini *et al*., 2022a, 2022b) ma anche pubblicazioni divulgative, fra cui un libro (Nesci e Valentini, 2019), che ha trovato la sua possibilità di realizzazione attraverso un Bando del Programma Operativo Regionale dedicato alla valorizzazione del territorio marchigiano.

Questa pubblicazione suggerisce, attraverso un approccio multidisciplinare, venti fra i paesaggi più belli e significativi della regione. Il punto di partenza è la descrizione geologica e morfologica attraverso un linguaggio scientifico semplice e divulgativo, concepito per gli amanti del territorio di ogni età ed ogni estrazione culturale. Per ciascuna località è indicato un itinerario con alcuni stop, da cui poter ammirare e comprendere le peculiarità di quel paesaggio. Per ogni luogo vengono individuate delle chiavi di lettura, legate alla genesi, all'evoluzione, alle fragilità, per poi rappresentarle attraverso il linguaggio musicale e poetico, nell'obiettivo di trasmettere gli stessi contenuti ma seguendo un percorso differente. Il risultato finale va oltre il libro cartaceo: i contenuti sono allegati in un dvd interattivo, con video realizzati sui luoghi, letture di poesie e musiche barocche eseguite al clavicembalo. Gli stessi contenuti sono sintetizzati nel sito web del gruppo (www.terreraremarche.it). Una proposta quindi dedicata agli amanti del territorio e dell'arte, rivolta a chi desidera conoscere qualcosa in più dei luoghi spettacolari della regione, mediante un percorso alternativo e multidisciplinare.

Durante gli spettacoli dal vivo (Fig. 18) vengono proposti cinque o sei luoghi, la loro storia geologica, l'interazione con l'uomo e con l'ambiente. Ogni luogo viene raccontato dal punto di vista scientifico, ma rappresentato anche attraverso una poesia, un brano musicale dal vivo e un video, utilizzando un percorso rivolto alla sfera emozionale. Un metodo che affianca scienza, poesia e musica: tre diverse forme di linguaggio per raccontare un territorio da differenti prospettive, con l'intenzione di trasmettere la storia e l'evoluzione dei paesaggi sottolineando le peculiarità geomorfologiche, ma anche quelle storico-culturali e non ultime le fragilità, nella convinzione che la bellezza del territorio venga amplificata dalla sua comprensione.

Più recentemente è stato concepito e sviluppato un approccio comunicativo che si svolge "sul campo", con l'organizzazione di escursioni a tema (Fig. 19), allo scopo di aggiungere il contatto diretto dei partecipanti con i luoghi, ad un metodo comunicativo che usa linguaggi alternativi, anche di tipo artistico.

Sono state sperimentate e confrontate 4 diverse modalità di escursione nell'ambito di un progetto, chiamato *Paesaggeo*, sviluppato nel corso di un dottorato di ricerca svolto presso l'Università di Urbino (Guerra, 2022), con le modalità descritte dettagliatamente in Valentini *et al*., 2022b.

- *Trekking nel Paesaggeo,* una classica escursione con una guida specializzata che spiega le caratteristiche geologiche;
- In *Esploriamo il Paesaggeo* la guida accompagna i visitatori fuori dai sentieri, alla ricerca di particolari geologici che possano aiutare nella comprensione dei meccanismi genetico-evolutivi e le fragilità del luogo.
- Una *Storia nel Paesaggeo*, è una modalità in cui si aggiungono racconti e cronache dei luoghi, con la partecipazione di attori che coinvolgono i partecipanti.
- In *Ascoltiamo il Paesaggeo*, infine, l'escursione sul terreno è accompagnata da esecuzioni di musica e poesia dal vivo.

In conclusione, queste esperienze vogliono rappresentare una testimonianza riguardo a esperienze di sensibilizzazione della comunità al paesaggio, che, va sottolineato, hanno prodotto una forte risposta positiva da parte degli utenti (Valentini *et al*., 2022).

Il Paesaggio rappresenta un bene inestimabile, che caratterizza un territorio in maniera esclusiva e racconta la storia di un luogo fin dalle sue origini, condizionandone gli insediamenti umani, la biodiversità e la cultura.

Conoscere il paesaggio è il primo passo per amarlo, proteggerlo e conservarlo per le future generazioni.

BIBLIOGRAFIA

Alessandroni, G., Bendia, F., Farabollini, P., Gennari, E., Nesci, O., Tatali, B., Valentini, L. (2023). *I geositi delle Marche: un patrimonio di geodiversità di eccezionale valore*. Supplemento Geologia dell'Ambiente n.2/2023 (in stampa).

Alvarez, W. (2019). *A review of the Earth history record in the Cretaceous, Paleogene, and Neogene pelagic carbonates of the Umbria-Marche Apennines (Italy): Twenty-five years of the Geological Observatory of Coldigioco*, in Koeberl, C., and Bice, D.M., eds., *250 Million Years of Earth History in Central Italy: Celebrating 25 Years of the Geological Observatory of Coldigioco*. Geo-

logical Society of America Special Paper 542, p. 1–58. https://doi.org/10.1130/2019.2542

Aringoli, D., Gentili, B., Materazzi, M., Pambianchi, G., Farabollini, P. (2014). *Il ruolo della gravità nell'evoluzione geomorfologica di un'area di falesia: Il caso del Monte Còndero (mare Adriatico, Italia Centrale)*. Studi Costieri, 22, 19–32.

Coccioni, R. (a cura di) (2003). *Verso la gestione integrata della costa del Monte San Bartolo: risultati di un progetto pilota*. Quaderni del Centro di Geobiologia, Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo", Arti Grafiche STIBU, Urbania, 1, 163 pp.

Coccioni, R. (a cura di) (2005). *La dinamica evolutiva della fascia costiera tra le foci dei fiumi Foglia e Metauro: verso la gestione integrata di una costa di elevato pregio ambientale*. Quaderni del Centro di Geobiologia, Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo", Arti Grafiche STIBU, Urbania, 3, 95 pp.

Colantoni, P., Mencucci, D., Nesci, O. (2004). *Coastal processes and cliff recession between Gabicce and Pesaro (Northern Adriatic Sea): a case history*. Geomorphology, 62: 257–268. ISSN: 0169

Coltorti, M., Farabollini, P., Gentili, B., Pambianchi, G. (1996). *Geomorphological evidence for anti-Apennine faults in the Umbro-Marchean Apennines and in the peri-Adriatic basin, Italy*. Geomrphology, 15(1): 33-45. https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00117-N

Dall'Aglio, P.L., Nesci, O. (2013). *Storia e geografia fisica del territorio costiero tra le foci dei fiumi Metauro e Foglia*. In: Debiasi A., Bassani M., Pastorio E. (eds), *L'indagine e la rima: scritti per Lorenzo Braccesi*. L'Erma di Bretschneider, Rome: 439–451.

Elmi, C., Colantoni, C., Gabbianelli, G., Nesci, O. (2002). *Holocene shorelines along the central adriatic coast (Italy)*. GeoActa, 1, 27-36.

Elmi, C., Forti, P., Nesci, O., Savelli, D. (2003). *La risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali nella pianura padana e veneto-friulana, nelle pianure minori e sulle coste nord e centro adriatiche*. In: Biancotti A., Motta M. (Eds.) *"Risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali"*. Glauco Brigati, Genova, 225-259.

Ginesu, S. (a cura di) (2011). *La costa d'Italia*. Carlo Delfino Editore, 472 pp. ISBN: 9788871385815

Grandgirard, V. (1997). *Géomorphologie et gestion du patrimoine naturel: la mémoire de la Terre est notre mémoire*. Geographica Helvetica, 52(2):47-56. https://doi.org/10.5194/gh-52-47-1997

Grandgirard, V. (1999). *L'évaluation des géotopes*. Geol. Insubr., 4, 66–69.

Guerra, V. (2022). *Researching geomorphological heritage of the Marecchia River Valley*. PhD Thesis, University of Urbino Carlo Bo, Urbino (PU) Italy, A.A. 2020/2021

Mayer, L., Menichetti, M., Nesci, O., Savelli, D. (2003). *Morphotectonic approach to the dreinage analysis in the North Marche region, central Italy*. Quaternary International, 101-102(1): 157-167.

Montanari, A.; Mainiero, M.; Coccioni, R.; Pignocchi, G. (2016). *Catastrophic landslide of medieval Portonovo (Ancona, Italy)*. Geol. Soc. Am. Bull., 128, 1660–1678.

Nesci, O. (1981). *Segnalazione di ciottoli fluviali sul Colle Ardizio (Pesaro) e deduzioni sulla evoluzione neotettonica del litorale pesarese*. Giorn. Geol., 43(2), 385-392.

Nesci, O., Savelli, D. (2003). *Diverging drainage in the Umbria-Marche Apennines (Central Italy)*. Quaternary International,101, 203-209.

Nesci, O., Valentini, L. (2019). *TerreRare. Le Marche: Scienza, Poesia, Musica*. Argalia Ed, Urbino (PU), 230 pp, ISBN 978-88-89731-20-8

Nesci, O., Valentini, L. (2020). *Science, poetry, and music for landscapes of the Marche Region, Italy: communicating the conservation of the natural heritage*. Geosci. Commun., 3, pp. 393–406. https://doi.org/10.5194/gc-3-393-2020

Passeri, L. (1994). *Appennino Umbro-Marchigiano. Guide Geologiche Regionali*, Società Geologica Italiana e BE-MA Editrice, Milano, pp. 301.

Pereira, P., Pereira, D. (2010). *Methodological guidelines for geomorphosite assessment*. Géomorphol. Relief Processus Environ., 16, 215–222.

Troiani, F., Martino, S., Marmoni, G.M., Menichetti, M., Torre, D., Iacobucci, G., Piacentini, D. (2020). *Integrated Field Surveying and Land Surface Quantitative Analysis to Assess Landslide Proneness in the Còndero Promontory Rocky Coast (Italy)*. Appl. Sci., 10(14).

Savelli, D., Troiani, F., Cavitolo, P., Nesci, O. (2017). *Rocky Cliffs Joining Velvet Beaches: The Northern Marche Coast*. © Springer International Publishing AG 2017, M. Soldati and M. Marchetti (eds.), Landscapes and Landforms of Italy, World Geomorphological Landscapes, 2-22

Valentini, L., Nesci, O. (2021). *A new approach to enhance the appeal of the Italian territory through art: three study cases from Marche Region*. Arabian Journal of Geosciences 14:144. https://doi.org/10.1007/s12517-020-06415-2

Valentini, L., Nesci, O., Carnevali, L., Baiocchi, S., Brizigotti, M., Teodori, S., Argalia, S. (2022a). *Landscape as a resource: science, poetry, and ancient music for the enhancement of the Marche Region, central Italy*. In: Recent Research on Geomorphology, Sedimentology, Marine Geosciences and Geochemistry. Advances in Scence, Technology and Innovation. Proceedings of the 2nd Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-2), Tunisia 2019, Ciner A. *et al*. Eds, Springer, pp. 107-9. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72547-1_24

Valentini, L., Guerra, V., Lazzari, M. (2022b). *Enhancement of Geoheritage and Development of Geotourism: Comparison and Inferences from Different Experiences of Communication through Art*. Geosciences, 12, 264. https://doi.org/10.3390/geosciences12070264

Wimbledon, W.A.P. (1996). *Geosites a new conservation initiative*, Episodes, 19:87-88.

Il contributo di un nuovo convertitore dell'energia del mare alla protezione delle coste ed alla produzione di energia pulita

The contribution of the new sea energy converter to coastal protection and the production of clean energy

Pierfranco Ventura[1], Manlio Palmarocchi[2], Claudio Domeniconi[3]

[1] Progettista Geotecnico
[2] Progettista Rinnovabili
[3] Progettista Meccanico

E-mail: pierfranco.ventura@stesecoetica.it (P. Ventura), mpalmarocchi37@gmail.com (M. Palmarocchi), claudio.domeniconi@outlook.com (C. Domeniconi)

Parole chiave: protezione coste erosione-allagamenti, convertitori energia marina, rinnovabili competitive, barriere di turbine galleggianti, riconversione scogliere, recupero spiagge, vivai posidonia
Key words: erosion-flooding coastal protection, marine energy converter, competitive renewables, floating turbines reef, reconversion breakwater, beach recovery, posidonia nursery

ABSTRACT

Si propone una ricerca sperimentale sul progetto del prototipo "Energy Reef" riguardante la realizzazione, in un piccolo golfo delle nostre coste, di una barriera dotata di particolari turbine, semisommersa rispetto al livello del mare, e posizionata nella "zona di calma". Tale zona si ha dove il mare avvicinandosi alla costa tocca la profondità di circa 10/12 metri e poi finisce quando arriva a 5/6 metri dove inizia la zona delle mareggiate. La barriera imita quella corallina, lontana dalle mareggiate, in modo da minimizzare i rischi. I vari moduli sono in buona parte prestampati 3D in leggera glebanite, ovvero in vetroresina riciclata, in modo da minimizzare le zavorre di ancoraggio per ottenere il galleggiamento delle giranti. la barriera e le turbine girando, tolgono energia alla sabbia in sospensione che va quindi a depositarsi accumulandosi sul fondale e difendendo in tal modo la costa con le relative infrastrutture. Le stesse turbine, contemporaneamente, producono energia e non solo; con la barriera si determina infatti una fascia protetta lungo la costa e pertanto: divieto di pesca, ritorno della posidonia e quindi della fauna ittica, nonché accumulo di plastica sul fondo che si può così recuperare. La barriera, oltre a proteggere la costa, produce in media 5 a 10 MW/km con onde da 5 fino a 10 kW/m, ed è competitiva con il fotovoltaico producendo anche di notte e maggiormente d'inverno; se usata anche come "ancoraggio" per un fotovoltaico galleggiante consente di incrementare la produzione di energia elettrica. La proposta è anche competitiva con l'eolico offshore specie galleggiante. È possibile inoltre la riconversione in barriere delle attuali difese quali scogliere e ripascimenti che presentano notevoli costi pubblici, specie di manutenzione e causano sensibili danni collaterali sul fondale, tanto che negli Stati Uniti le scogliere sono state proibite. La barriera proposta con la sua produzione di energia è l'unica, fra le varie fonti rinnovabili, che consente anche la protezione delle numerose coste in erosione e le relative infrastrutture, con evidenti vantaggi per gli investimenti.

LE ENERGIE RINNOVABILI

Il consumo complessivo di energia elettrica in Italia è intorno ai 300 miliardi kWh/anno prodotti alternando nel funzionamento potenze di 50 milioni kW (60 di picco estivo) su le circa 120 totali, in modo da coprire le 8760 ore da erogare nell'anno.

Tali consumi sono attualmente alimentati in Italia da oltre 10 milioni kW (10 GW) eolici che erogano circa 19 miliardi kWh/y e da 22 milioni kW fotovoltaici, che forniscono 25 miliardi kWh/y. L'idroelettrico inoltre ha una potenza di circa 19 milioni kW con erogazioni di 46 miliardi di kWh/y, peraltro in riduzione a causa della siccità. Ancora piccolo è il contributo del geotermico e da biomasse, specie da *rifiuti e liquami*, alla complessiva produzione di energia ed alla eliminazione degli scarichi fognari a mare.

Pertanto la produzione delle "rinnovabili" in totale è dell'ordine di *90/300 miliardi kWh/y = 30%* del fabbisogno italiano, *senza incentivi*.

La produzione termoelettrica a gas pari a 41 milioni kW e 125 miliardi kWh/y, con altri circa 70 da altre fonti fossili e 15 da nucleare importato, coprono il rimanente 70% (300 – 90 = 210 miliardi kWh/y).

Si evidenzia inoltre che dei 75 miliardi di m^3/y di gas importati in Italia, circa 30 alimentano la predetta produzione termoelettrica ed il resto serve per l'uso industriale, agricolo e domestico (consumo-tipo domestico 0,5 kWh/h, medio 2700 kWh/anno).

Il predetto 70% di produzione di energia da fonti fossili comporta la maggior parte del rilascio di CO_2, nonché delle altre sostanze inquinanti. Ciò può essere realisticamente ridotto con *nuove regole internazionali,* in parte

avviate, per lo sviluppo delle energie rinnovabili e con il risparmio dei consumi, riducendo molto **i** *costi dei danni socio-ambientali***.**

La capacità di produzione dell'eolico e del fotovoltaico rispetto a quella nominale massima (*capacity factor)* presenta valori dell'ordine del 30% (media 15%) con percentuali peraltro migliori per l'idroelettrico e che per il marino proposto sono maggiori e dell'ordine del 50%, tanto da promuoverne la convenienza quantomeno della Ricerca.

La capacità di produzione annua rinnovabile migliora notevolmente se si usano anche sistemi di accumulo: da quello idraulico con pompe/turbine usate anche nelle casse di espansione fluviali in quota, fino ai recenti polmoni idrostatici sul fondale o i contrappesi sommersi a saliscendi verticali, in modo da compensare le ore di bassa o nulla produzione.

Nel caso dell'energia marina con le barriere proposte funzionanti per 4000 h/y con capacità media di 5 MW/km (50 % delle ore/anno e della potenza nominale di picco di 10 MW) si possono ricavare 20 GWh/y; per cui con 100 km di costa, oltretutto protetta, si ottengono 2miliardi di kWh, fruibili da oltre 400.000 abitanti.

Il *contributo dell'energia marina* è confrontabile con le altre rinnovabili, consentendo di coprire in pochi anni numerosi fabbisogni domestici e delle medie e piccole imprese, nonché proteggere le coste.

Tali produzioni sono incrementabili con quelle degli impianti *fotovoltaici galleggianti* e soprattutto non hanno l'*impatto ambientale* a terra che ne blocca spesso la costruzione.

L'ENERGIA MARINA

Tutti i media, specie in Italia, presentano come rinnovabili solo le pale eoliche e i pannelli fotovoltaici, mentre la produzione di energia marina è praticamente assente, pur essendo invece realizzabile, specie in Italia circondata dal mare.

Nel 2012 si organizzò una giornata di studio (Fig. 1) invitando anzitutto a descrivere le iniziative italiane per confrontarle con quelle internazionali; proseguiti con raccolte di stati dell'arte fino al Blue Deal di Enea del 2022.

Nei riguardi della produzione di energia dal mare sono state realizzate una decina di tipologie di soluzioni con oltre 5700 brevetti in svariate Nazioni, specie WEC Wave Energy Converter: dai pistoni verticali offshore di Emec, a galleggianti orizzontali Flotec in Scozia, fino ai frangenti contro falesie di Oyster in Scozia o Oscillating floaters di Eco Wave Power in Gibilterra ed a Maiorca.

Attualmente in Italia vengono sperimentate: turbina tipo l'aquilone di mare con l'elica di tipo aeronautico o sotto una zattera (Coiro - Venezia o Kobold - Stretto di Messina), pulsatore articolato (40South Energy, ENEL Green Power - Castiglioncello), colonne risonanti aria-onda nei moli (Boccotti – Civitavecchia WEC SAX; Lipari), zattera giroscopica (ISWEC- Politecnico Torino, ENI, MORE - Ravenna, 2020), pendolo PEWEC (ENEA), oscillating floaters (Coastenergy Italia-Croazia).

Produzioni analoghe si ottengono da multi-eliche in correnti fluviali (Watercity - Rovereto) o nella Gironda a Bordeaux, mini-idroelettrico (Lazzarini&Lucchini - Gottolengo MN) o in 13 briglie sull'Arno (Iniziative Bresciane). Si comincia a parlare di giganteschi eolici offshore imitando i parchi danesi passati da 20 turbine di 2 MW del 2000 a turbine da 14 MW per parchi offshore galleggianti da oltre 800 MW, previsti anche per l'Italia nel 2035.

La nuova barriera di seguito proposta presenta nel confronto con il fotovoltaico, aspetti interessanti di produzione rinnovabile specie nei riguardi delle ore di erogazione notturne e invernali. A differenza di altri convertitori di energia dal mare presenta la capacità di protezione delle coste dall'erosione.

Utilizzando numerosi convertitori relativamente piccoli, è competitiva con i predetti singoli eolici di notevoli dimensioni. Inoltre la manutenzione di tale barriera è supportata dalla produzione di elettricità ed è ben più contenuta di quella dei grandi convertitori nei Mari del Nord, essendo l'energia del mare Mediterraneo ben inferiore (10 kW/m versus 75 kW/m).

Il termine rinnovabile è pertanto esteso alla protezione delle coste basandolo anche sulla riconversione delle tradizionali scogliere di massi o dei ripascimenti artificiali, con

Figura 1. Sistemi di produzione di energia dal mare in Italia e all'estero, Giornata di Studio STES, AGHAPE. Roma 7 giugno 2012; Logo Energy Reef per lo sviluppo del progetto.

nuove barriere artificiali che imitano la barriera corallina e producono energia elettrica e ripascimento naturale.

Se si volesse proteggere con i ripascimenti artificiali i 4000 km di coste basse italiane, allagabili con l'innalzamento del livello del mare, ci vorrebbe un numero enorme di cave e di miliardi di m^3 specie di sabbia (Pranzini 2022).

Il contributo delle rinnovabili ai cambiamenti climatici da *antropocene* e specie al *disinquinamento delle grandi città,* in base ai dati appena citati, è sicuramente coadiuvato dall'efficientamento energetico anche se la tecnologia da sola non è risolutiva, ma sono fondamentali le scelte di vita sobria e solidale di ciascuno.

I risparmi energetici dall'ecobilancio industriale all'economia circolare dei rifiuti, dal riparare al ridurre l'usa e getta, rimettendo al centro la qualità e la credibilità su ciò che si produce, migliorano ed aumentano sicuramente il lavoro, come ad esempio con il disinquinamento ed il recupero delle coste e dei porti di seguito proposto.

NUOVA BARRIERA ARTIFICIALE

Gli aspetti innovativi su cui si basa il nuovo tipo di convertitore di energia marina sono incentrati sia sulla particolare posizione offshore/inshore in una fascia calma di mare lontana dalle mareggiate che *minimizza i rischi,* simili a quelli delle *acquacolture,* e ne garantisce una contenuta manutenzione, (Fig. 2a) sia su un galleggiamento prossimo all'indifferente (Fig. 2b) che ne migliora l'efficienza in produzione di elettricità: la disposizione in barriera antierosione smorza efficacemente l'energia cinetica delle correnti inshore.

Tali innovazioni da un lato cercano di imitare la natura degli organismi marini e dall'altro lato attingono alle radici storiche: da quelle archimedee e delle ruote idrauliche fluviali, senza oscillazioni fra magre e piene, fino alla fluidodinamica marina e al moderno monitoraggio delle coste. In proposito è fondamentale il rilievo con droni della velocità delle correnti marine, dei dati meteo-marittimi, degli angoli di traversia, delle correnti litoranee, di modifica dei paraggi e dei rilievi batimetrici specie riguardanti la barra mobile invernale.

I rilievi satellitari hanno evidenziato che in presenza di scogliere e di pennelli di massi i fondali subiscono forti sconvolgimenti con canali e affossamenti o accumuli e intasamenti (Paltrinieri, Faina 2021) causati proprio dal posizionamento di tali difese su bassi fondali, al fine di limitarne l'estensione trapezoidale, ovvero proprio nella fascia delle mareggiate (*storms energy* Fig. 2a). Ciò, accoppiato alla rigida sezione trapezia delle scogliere, esalta sopraflutto le mareggiate e le correnti di fondo, anziché laminarle e smorzarle secondo il naturale frangimento delle onde e conseguente appiattimento (*shoaling*), sino a sradicare o seppellire la posidonia e desertificare e sconvolgere i fondali.

Per tali ragioni, in USA le scogliere sono attualmente proibite (Cipriani 2021), ciò anche per eliminare i danni ambientali delle cave, come anche proibito in varie Regioni italiane.

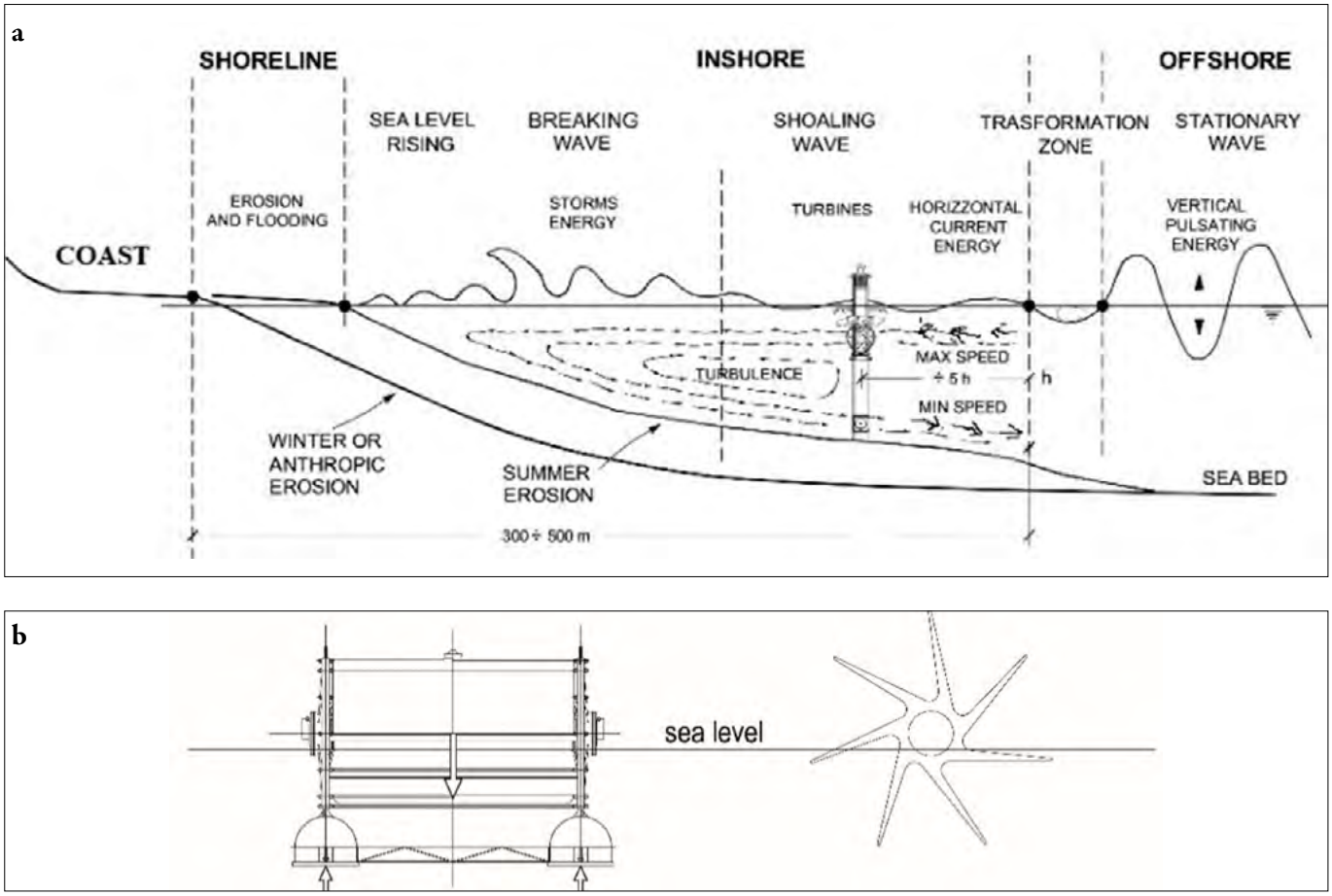


Figura 2. Aspetti innovativi: a) posizione delle turbine che imita le barriere coralline nell'area di calma generata dalla trasformazione dell'energia pulsante verticale offshore in correnti orizzontali inshore superficiali e sul fondale; b) Equilibrio della girante ad asse orizzontale prossimo all'indifferente o mesogalleggiante, tipo meduse, in modo da ruotare anche con le minime velocità delle correnti.

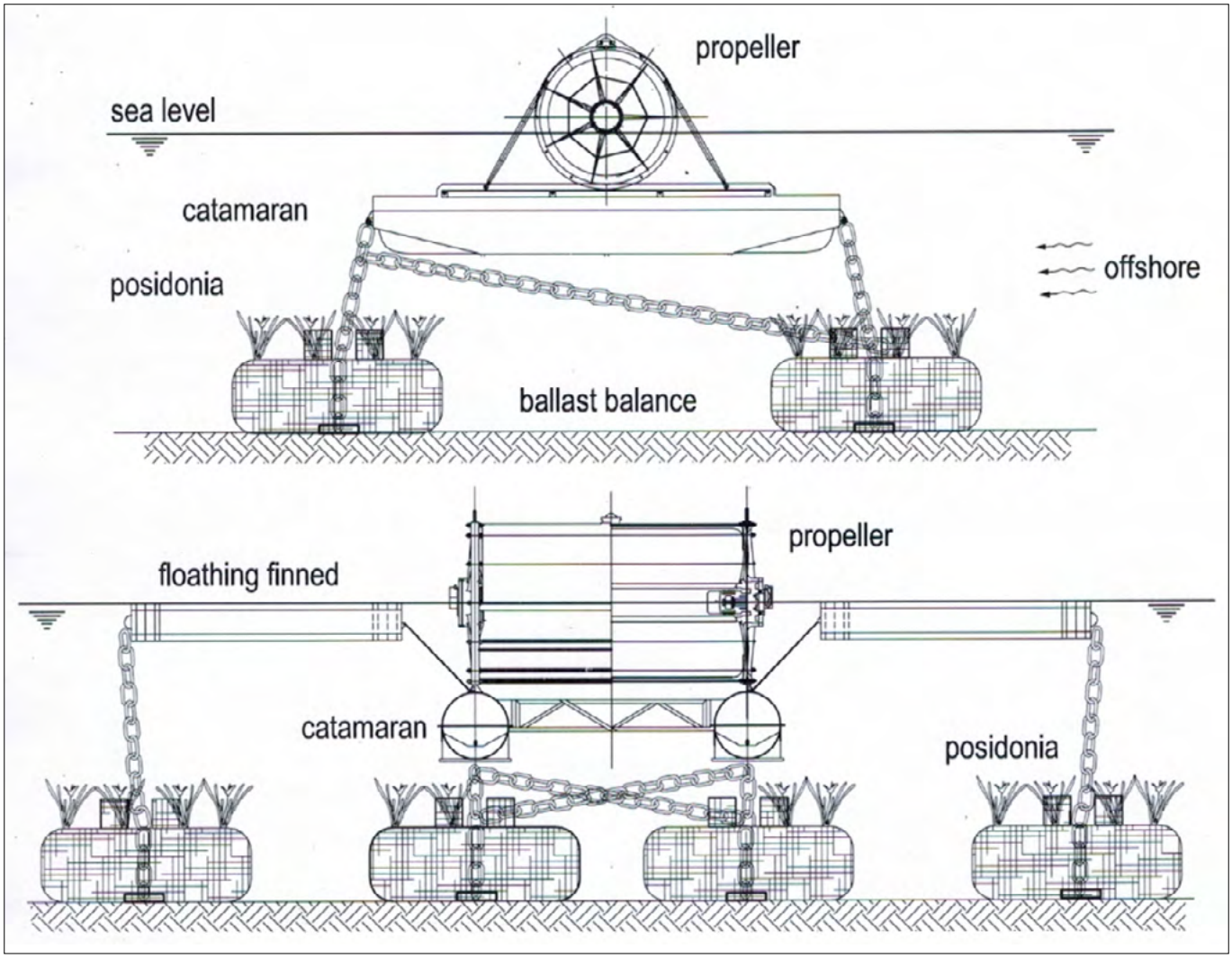


Figura 3. Turbina con girante ad asse orizzontale a 7 pale semisommerse nelle correnti superficiali, affiancata da galleggianti alettati di smorzamento e convogliamento, ancorati con catene incrociate a zavorre. Queste sono salpabili e smorzano le correnti erodenti sul fondale, tipo scogliere soffolte, che qualora esistenti possono servire per ancorare le turbine. La barriera può essere ad es. di 50 moduli ogni 20 m con 100 turbine da 3 MW in 1 km o con maggiore produzione senza floathing finned (Fig. 5).

Si propone pertanto un nuovo tipo di turbina con girante ad asse orizzontale che aziona due generatori da 30+ 30 kW tarati con l'analisi dinamica sulle correnti previste fino a 3m/s o 6 nodi in modo da utilizzare le turbine più efficaci a sfruttarne l'energia cinetica.

Si noti la maggiore efficienza, rispetto all'eolico, dovuta alla distribuzione simmetrica dei generatori coassiali alle pale e per l'assenza, rispetto agli WEC, di meccanismi pulsanti. Ciascun modulo (Fig. 3) è reso galleggiante nella prima versione tramite un catamarano sommerso ad altezza opportuna e ancorato con catene a zavorre forate che consentono di realizzare anche habitat per la fauna ittica; le dimensioni delle zavorre si riducono scegliendo materiali più leggeri per il modulo.

I corti ancoraggi minimizzano i rollii-beccheggi-imbardate che sono invece rilevanti nei giganteschi eolici offshore galleggianti, con ben più delicate valutazioni della sicurezza; in tale confronto altrettanto minima è la lunghezza dei cavi sottomarini fino a terra.

Il rischio da maremoti, è prevenuto dalla posizione nella fascia di calma della barriera (Fig. 2) e prima del forte innalzamento dell'onda anomala, a causa della rapida riduzione delle profondità del fondale vicino alla costa. L'onda anomala subdolamente, specie nel Mediterraneo, non allarma quando è a largo, peraltro con tempi di ritorno elevati ed eventi molto rari sopra il metro di altezza a largo. Si evidenzia che la girante è semisommersa in modo da attingere le massime velocità delle correnti tipicamente superficiali e di non subire gli effetti di venti contrari essendo ricoperte da una cuffia anche antiurti; le pale sono 7 protette dalla corrosione e dal fouling, tramite pulizia sub diretta e periodica essendo i moduli sganciabili dalle zavorre. La girante, in una prima versione della barriera, è coadiuvata da 2 galleggianti laterali, angolati in pianta ad imbuto, in modo da favorire il convogliamento delle correnti marine superficiali. Si è passati poi alla versione più compatta delle *Figg*. 5 e 6.

Tali galleggianti laterali sono inoltre alettati in modo da contribuire ulteriormente a smorzare l'energia cinetica sottoflutto e ridurre l'erosione, come sperimentato in vasca navale a Roma (Ventura 1992) e attraverso i vari sviluppi del progetto (Fig. 5) descritti nel sito www.stesecoetica.it e in numerose pubblicazioni.

La proposta ha ottenuto, attraverso la Commissione del Patent Office di Monaco, il brevetto n° 0001411057 e il deposito CNRSOLAR9861TR2914: ciò è stato fatto per ufficializzare l'originalità dell'innovazione e consentire lo

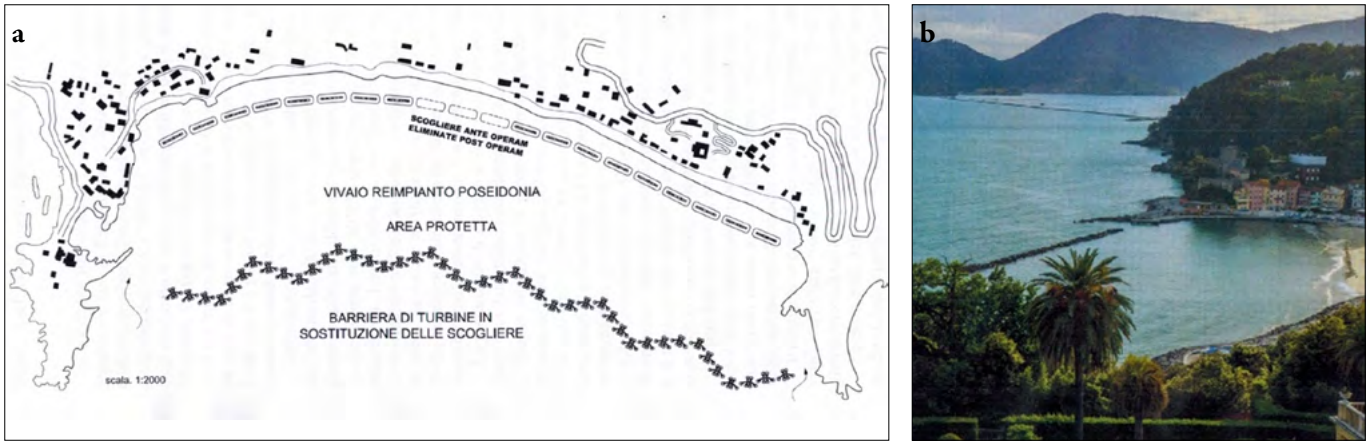


Figura 4. a) Barriera, semplificata in una baia fra due promontori, con una fila di moduli antierosione che consentono anche un'area protetta per far attecchire un vivaio di posidonia. La barriera è proposta in sostituzione di 3 scogliere per sperimentarne rapidamente l'efficacia nelle condizioni di erosione esaltata e successivamente la possibilità di recuperare il paesaggio senza scogliere; b) similitudine con una baia protetta invece da scogliere.

Tabella 1. Analisi dei benefici della nuova barriera di turbine per la protezione delle coste

Le turbine sono poste nella zona di calma imitando la *barriera corallina* per cui la manutenzione è sostenibile, anche in quanto si agisce su fondali a profondità di circa 10 m facilmente raggiungibili.
Il particolare galleggiamento quasi indifferente, tipo *meduse*, consente di sfruttare anche le basse velocità delle correnti marine, anche con l'ausilio di un convogliatore, e rende le turbine antisismiche, ovvero in servizio durante i terremoti.
Si sfruttano le *correnti superficiali*, quelle utilizzate da surfisti, che sono dovute alla potente trasformazione dell'energia offshore, pulsante solo verticale, in energia cinetica di correnti marine con velocità orizzontali, con necessaria transizione e creazione della fascia di calma.
La barriera di turbine offre una *protezione "morbida"* ovvero riducendo la velocità delle correnti, sia superficiali che di ritorno sul fondale, consente alle sabbie in sospensione di depositarsi e sopraelevare il litorale proteggendolo anche dall'*allagamento* causato dall'innalzamento del mare.
La proposta *elimina le scogliere*, ormai proibite in USA, in quanto esaltano le mareggiate sconvolgendo il fondale; si ottiene invece un recupero del paesaggio e dell'ecosistema del fondale protetto che consente di far attecchire i vivai di *posidonia*, che assorbono CO_2 oltre 10 volte di più di una foresta; la delimitazione della barriera favorisce poi il disinquinamento dalle plastiche, anche con l'ausilio di reti lungo la barriera.
I vantaggi economici rispetto ai *ripascimenti artificiali* sono notevoli: essendo proibite le cave a terra, si evitano milioni di m^3 spesso di sedimi fini aspirati a largo non idonei e sistematicamente rimossi dalle mareggiate invernali., con costi specie di manutenzione annua molto rilevanti.
La proposta offre il notevole beneficio economico della *protezione delle coste* che è invece assente in tutte le altre produzioni di energie rinnovabili.
La produzione di elettricità delle barriere può in particolare servire per alimentare le grandi navi attraccate nei porti evitando l'immissione dei fumi inquinanti dai motori diesel.
La barriera consente di produrre 5-10 *MW/km* di picco, specie al crescere dell'energia delle onde da 5 kW/m fino a 10 kW/m, con investimenti paragonabili fino ad oltre 3 ettari di fotovoltaico o all'eolico offshore fondato a 50m di profondità (non galleggiante) realizzato a Taranto, sviluppando l'indipendenza energetica senza incentivi.
Il *fotovoltaico galleggiante* può facilmente sovrapporsi alla barriera proposta, sfruttando le catene e le zavorre di ancoraggio, incrementandone la produzione di corrente elettrica.
In particolare è opportuno fare un confronto economico con i giganteschi *eolici offshore galleggianti* proposti da Falk in Numero di 63 a Budoni in Sardegna e da Enea-Regione Lazio in numero di 27 a Civitavecchia, peraltro privi della capacità di protezione delle coste.
Le scogliere rimosse possono essere utilizzate come materiali per il ripascimento artificiale, *macinando il pietrisco* in modo da ottenere ripascimenti con una granulometria idonea per smorzare le correnti sui fondali.
I moduli delle barriere sono *prefabbricati con stampante 3D e* salpabili dalle banchine portuali. Si prevede l'uso di *materiali leggeri* tipo la glebanite ovvero la vetroresina *fibrorinforzata riciclata,* con notevoli vantaggi ambientali ed economici rispetto all'alluminio, impiegato solo per le parti più sollecitate.
Lo scafo-convogliatore è opportunamente ancorato per ottenere il *mesogalleggiamento*; la girante ad asse orizzontale inoltre rivisita le storiche ruote idrauliche, senza però le sensibili penalizzazioni delle oscillazioni dei livelli dei fiumi.

sviluppo della Ricerca e delle promettenti applicazioni nello spirito che non s'inventa ma si scopre.

Il progetto del prototipo, individuato con il logo di Fig. 1, è stato completamente sviluppato tramite relazione, tavole, particolari costruttivi e computo metrico. Molto importante è la scelta dei materiali che più che di alluminio e acciaio, di primo dimensionamento meccanico, sono previsti di tipo eminentemente riciclabile fibrorinforzato.

BENEFICI DELL'ENERGY REEF

L'Italia interamente circondata dal mare, fonte di importanti economie turistiche e commerciali, deve decisamente proteggere le sue coste dall'erosione e dall'inquinamento.

Dei 7914 km di coste ben 1291 km sono difesi da scogliere ed altre da ripascimenti artificiali specie riguardanti i 3600 km sabbiosi. Tuttavia oltre 1200 km di spiagge sono in erosione con arretramenti continui anche dell'ordine di 5- 10 m/anno, ovvero ben oltre le naturali oscillazioni estate/inverno periodiche massime di 5m/anno.

I sopra evidenziati vantaggi di sostituire le scogliere con una barriera di turbine, sfalsate in modo da adattarsi ai vari angoli di traversia, Fig. 4b, consentono inoltre di sperimentare in un'invernata di mareggiate l'efficacia del sistema.

Si propone di eliminare parte delle scogliere e di installare la barriera di turbine a protezione della costa. In tal modo si sperimenta subito l'efficacia della barriera in condizioni di erosione esaltata dalle scogliere rimaste.

Se s'impiegano moduli da 20m disposti con continuità, per il massimo effetto anti-erosione, ovvero s'installano 100 turbine da 30 kW/km si ottiene una potenza da 3 MW/km con erogazione dell'ordine di 10 GWh/y e recuperi di ettari/anni di spiagge.

Tali MW sono incrementabili maggiorando l'estensione e il numero dei convertitori (Fig. 5), peraltro più articolati in mare aperto per smorzare anche le correnti specie litoranee.

Notevoli sono poi gli altri vantaggi della barriera che sono riportati nella Tab. 1 per facilitare gli spunti di riflessione e le osservazioni.

La barriera tende a integrare la barra mobile invernale, "duna sommersa" ultimo baluardo ove a terra è stato tutto urbanizzato, per cui le velocità delle correnti da smorzare sono in eccesso rispetto a quelle che generavano l'erosione naturale estate/inverno.

Il finanziamento della sperimentazione deve essere *sussidiato dalla partecipazione pubblica e privata* con accordo sull'utilizzo del prototipo (*spin off*), anche per ricercare soluzioni diverse dalle scogliere che sono, come sopra evidenziato, decisamente anti-ecologiche. Sotto la spinta della crescita vertiginosa dei costi del MWh, a causa dell'alto prezzo marginale del gas, sono in atto le semplificazioni dei rilasci delle autorizzazioni per costituire le *Comunità energetiche rinnovabili (Cer)* con vantaggi nel tempo su clima-povertà-pace-costruzione capitale sociale (Becchetti 2022).

L'apertura alle rinnovabili per la produzione di elettricità è l'evidente via per promuovere anche lo sfruttamento dell'energia del mare e favorirne la diffusione a *costi competitivi*: domanda, offerta e fatturato giustificano bene la *curva d'investimento.*

Il recupero di ettari di spiagge potrebbe essere soggetto ad un *"contributo di scopo"* a carico degli stabilimenti balneari che usufruirebbero del recupero del paesaggio e del maggior turismo. I vantaggi della proposta sono decisamente numerosi tanto da coprire il rischio della ricerca, peraltro tipicamente intrinseco ad ogni sperimentazione.

In caso di validazione si potrà accedere ai fondi PNRR e si potranno appaltare le barriere proposte per la protezione delle coste, in modo simile all'appalto per il consolidamento di una frana validato in base al monitoraggio, secondo il metodo osservazionale previsto dalla Normativa Tecnica vigente.

INCREMENTI DELLA PRODUZIONE DI ELETTRICITÀ

La predetta analisi costi/benefici in base alla sempre più urgente necessità di produrre energie rinnovabili può essere fortemente sviluppata incrementando nella barriera il numero delle turbine.

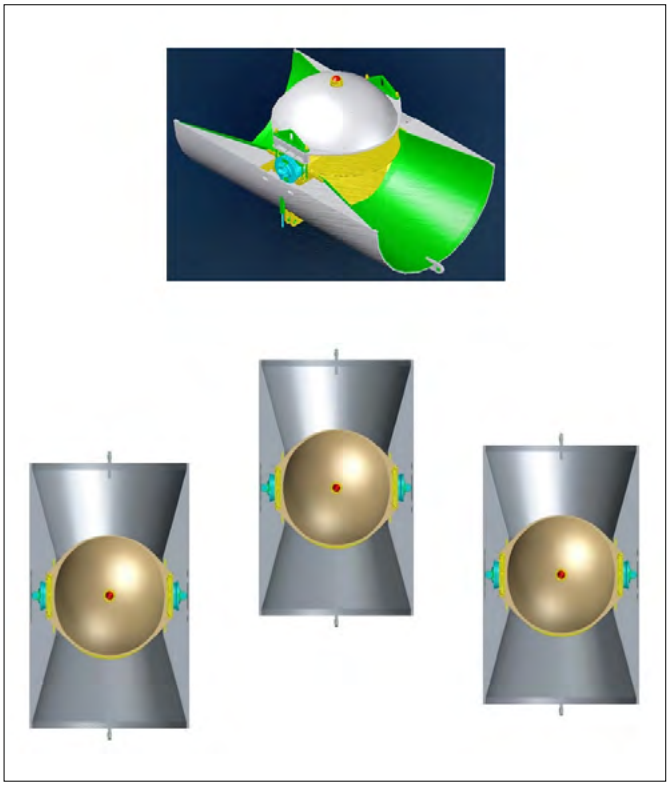


Figura 5. Barriera senza i galleggianti alettati, ma con convogliatore compatto collaborante, e interamente composta da giranti, ciascuna con 2 turbine e cavi sottomarini raggruppati, per la massima produzione di corrente fino a 12 MW/km e il massimo effetto anti-erosione: 2 file di 100 moduli ad interassi di 10 m sfalsati in 1 km.

Se si lascia la fitta continuità dei moduli della barriera (Fig. 5) per avere anche la massima efficienza anti-erosione, si possono sostituire i galleggianti alettati con le giranti del modulo in 3D (Fig. 6) e con le pale semicircolari conformi al convogliatore (effetto Venturi).

La barriera è dotata di lampade di segnalazione e passaggi per le imbarcazioni in base all'estensione; i moduli possono essere ancorati su scogliere soffolte esistenti.

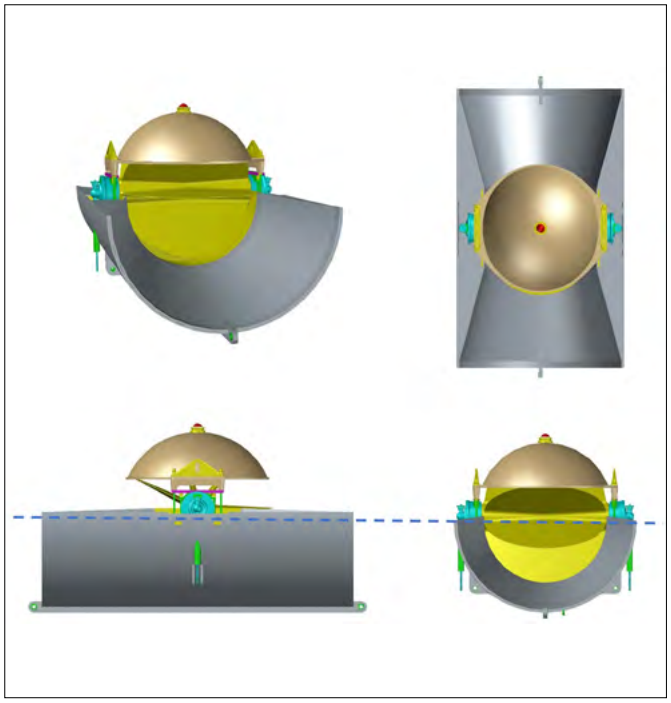


Figura 6. Viste 3D e 2D del modulo prototipo in glebanite, da tarare al sito prescelto: la girante, il cui mozzo in alluminio contiene i generatori, presenta 7 pale semicircolari, anch'esse in glebanite da 4 m^2 con raggio di 1,6 m di pescaggio ove le velocità delle correnti marine superficiali sono massime; i 2 generatori di elettricità, coassiali alla girante, sono ciascuno da 30 kW, con i relativi cavi sottomarini; i galleggianti anziché a catamarano sono con una carena a culla del convogliatore che supporta la girante; il convogliatore incrementa il flusso sulle pale; la cuffia copre solo le semi-pale in aria, ovvero non controcorrente e sopra la linea tratteggiata del sea level; i prigionieri sono rinforzati antiurti ed in modo anche da consentire il sollevamento del modulo per la manutenzione. Il modulo è aggiornato rendendo le varie parti collaboranti più resistenti per forma e fissate telescopicamente ad un monopalo anziché a catene zavorrate.

Come in Fig. 5 si otterrebbe anche una maggiore produzione energetica da 200 turbine di 30 + 30 kW di picco, ovvero 12 MW/km nominali di barriera, specie con onde da 10 kW/m, e si può arrivare mediamente a 30 GWh/y/km (30 milioni kWh/anno/km).

Si fornirebbero 10.000 abitazioni e si eliminerebbero 15.000 tonnellate di CO_2 da termoelettrico a gas, corrispondenti alle emissioni annue di circa 5000 auto a benzina.

Il maggior costo delle turbine è compensato dal sensibile aumento del prezzo di vendita del kWh, con dimensionamenti e lunghezze adattabili nel tempo all'analisi costi/benefici.

La barriera, prodotta in serie e accoppiando le zavorre in materassi continui tipo scogliere soffolte, diventa poi economicamente confrontabile con i giganteschi eolici offshore specie galleggianti da 14 MW di picco.

I costi di tale eolico sono elevatissimi in quanto necessitano di grandi quantità di materiali con problemi di approvvigionamento e di manodopera, specie per i montaggi a largo; tali costi sono invece più contenuti per piccole e numerose turbine realizzabili in serie con grandi stampanti 3D (MasterPrint, Ingersoll) e con varo premontato nella *fascia di calma*.

La barriera inoltre presenta una maggiore sicurezza e minore *manutenzione* essendo la profondità del fondale di posa circa 10m, anziché ancorato a centinaia di metri. I moduli sono adattabili con l'innalzamento del mare o spostamenti eccezionali.

In Italia si è programmato un incremento della potenza delle rinnovabili, specie nel Mezzogiorno, dai predetti attuali 50 GW ai 70 GW, ovvero da 90 a 125 miliardi di kWh/anno, a cui l'energia marina potrebbe dare un buon contributo.

Mirati piani d'investimento sul *Green New Deal* contribuirebbero inoltre alla salvaguardia dell'ambiente marino ed alla costruzione del capitale sociale locale (*Prosumer*).

Le famose Aziende italiane nel campo nautico possono essere integrate producendo i proposti nuovi convertitori.

Appaiono appropriate le parole di Saint Exupéry "Se vuoi costruire una nave, non devi per prima cosa affaticarti a chiamare la gente, a raccogliere la legna..., ma invece prima risveglia negli uomini la nostalgia del mare...".

BIBLIOGRAFIA

Becchetti L. (2022), *Agire per le comunità energetiche,* Corso di formazione nazionale per un'ecologia integrale, Focsiv, Caritas Italiana, Fondazione Lanza, webzoom, 7 nov.

Cipriani L. E. (2021), *Linee guida nazionali per la difesa e il riequilibrio della costa,* webinar: Il litorale toscano: dinamiche, riqualificazioni e difesa, SIGEA, Alta Scuola, Consiglio Nazionale Geologi, 13 aprile, Castiglione della Pescaglia (GR).

Paltrinieri D., Faina G. (2021), *Il litorale di Castiglione della Pescaglia: proposte progettuali in corso e ipotesi alternative basate su un diverso approccio della idrodinamica costiera,* Il litorale toscano: dinamiche, riqualificazione e difesa, webinar SIGEA, Alta Scuola, Consiglio Nazionale Geologi, 13 aprile, Castiglione della Pescaglia (GR); Poster *Systemic revision of coastal morphodynamics,* Accademia dei Lincei, Roma 21 marzo 2019.

Pranzini E. (2022), *Difesa dei litorali o difesa delle spiagge,* La Geologia Ambientale al Servizio del Paese, Palazzo Mattei, Villa Celimontana Roma 10-11 ottobre.

Ricci Lucchi F. (1992), *I Ritmi del Mare,* pp. 251, La Nuova Italia scientifica, Roma.

Ventura P. (1992), *Prove su modello di frangiflutti galleggiante per la difesa dall'erosione delle coste*, 3° AIOM Congress on marine and offshore engineering, 7-8-9 giugno, Genova, pp. 59-66.

Ventura P. (2018), Fondazioni: Modellazioni statiche e sismiche, vol. I, pp. 777; Applicazioni statiche e sismiche, vol. II, pp. 782, Ulrico Hoepli Editore, Milano, ISBN 978-88-203-8644-3.

Ventura P., Palmarocchi M., Domeniconi C. (2022), *New artificial reef in coastal protection reconversion and electric power production*, CNR-IBE Institute for Bioeconomy, Proceedings of 9th Int. Symposium "Monitoring of Mediterranean coastal areas: problems and measurement techniques", 14-16 giugno Livorno, FUP - Firenze University Press, DOI, Poster e bibliografia estesa www.stesecoetica.it.

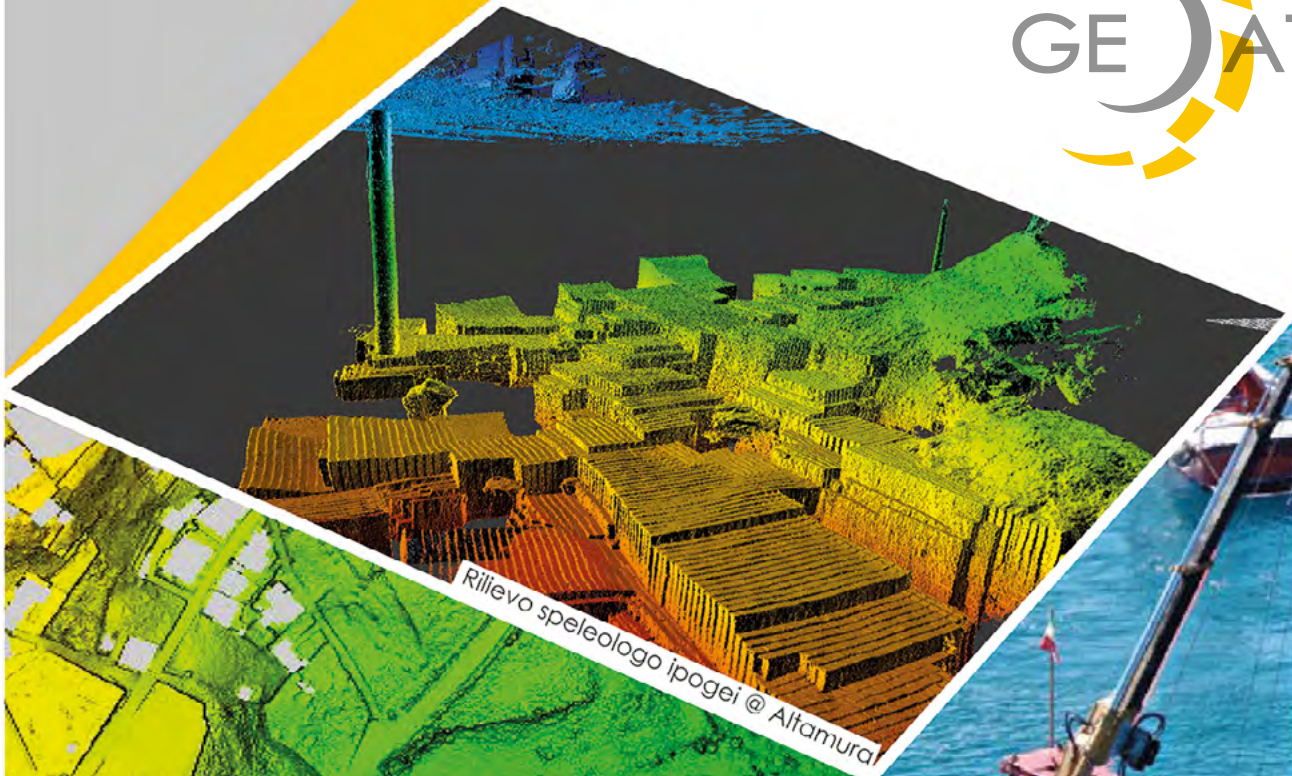
Geo Coste

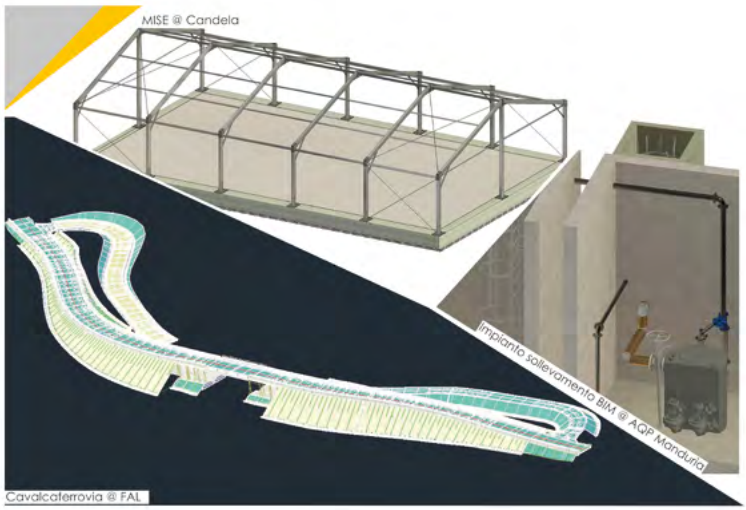
STUDI COSTIERI
E GEOFISICA MARINA

www.geocoste.com

Servizi per il territorio

GE ATLAS





Geomatica Geotecnica Geologia
Indagini Geofisiche Progettazione BIM
Diagnostica strutturale
e dei beni culturali
Infrastrutture Idraulica
Geologia applicata
Monitoraggio strutturale
SIT e WebGIS Monitoraggio ambientale
Strutture Archeologia Agronomia

www.geoatlas.it - info@geoatlas.it

Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

www.sigeaweb.it

5X1000

Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

Aiutaci a promuovere la CULTURA GEOLOGICA e la TUTELA DELL'AMBIENTE

DESTINA IL

CINQUE X MILLE ALLA SIGEA-APS

C.F. 04336801008

Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

www.sigeaweb.it - info@sigeaweb.it

In questa raccolta monografia di studi e ricerche condotti sull'evoluzione delle coste italiane, si affronta l'analisi dei meccanismi evolutivi che determinano le modificazioni di quel labile e mutevole limite tra mare e terra, dove si concentrano molte attività economiche - turistiche, si affacciano estesi tratti urbani, si collocano punti di approdo di direttrici di collegamento nazionale ed internazionale e si individuano aree di valore turistico archeologico o ambientale, soggette a tutela per la loro specifica ed unica bio e geo diversità. Gli studi si concentrano sui fattori che agiscono sulle modificazioni, sia lente che repentine e traumatiche delle linee di costa, esaminando i fattori predisponenti e scatenanti che governano i cambiamenti, che ne condizionano l'evoluzione e ne determinano l'accrescimento o la riduzione. Vengono individuati i fattori che presiedono alle variazioni, e gli effetti conseguenti sull'economia locale e le ricadute sulle risorse ambientali, storiche e testimoniali che spesso sono coinvolte in repentine trasformazioni. Si esaminano anche gli effetti del trasporto solido sui processi di variazione della linea di costa, l'incidenza della subsidenza, dei cambiamenti climatici e della variazione del livello medio marino, attraverso l'esame di casi specifici, geograficamente localizzati. Si esaminano inoltre le modalità di mitigazione degli effetti di modificazione del profilo delle coste, gli strumenti adottati per contrastare quelle variazioni che interagiscono negativamente sulla stabilità dell'urbanizzato, sulla efficienza delle linee di comunicazione, sulla tutela delle risorse storico archeologiche e ambientali e sul mantenimento del valore turistico ed economico di molti tratti delle nostre coste, attraverso l'impiego di tecniche naturalistiche, recupero sedimentario o opere strutturali.

Francesco Stragapede nasce a Bari il 1964. Si laurea in Scienze Geologiche presso l'Università di Bari ed intraprende la libera professione, operando nel campo della Geologia Applicata, della Idrogeologia e della Geofisica, sull'intero territorio nazionale. Nell'ambito delle attività professionali, opera nei diversi settori della geologia applicata e della idrogeologia, nell'ambito delle attività edilizie, dell'attività estrattiva e della ricerca e della gestione delle risorse idriche; si specializza in geofisica applicata alla caratterizzazione progettuale di sito, alla pianificazione e alla microzonazione sismica, e in pedologia per le applicazioni nella pratica geologica. Organizza e svolge corsi di formazione per l'impiego delle tecniche geofisiche e l'utilizzo dei dati, per le analisi di sito nella pratica professionale; ha organizzato convegni regionali e nazionali e webinar per la valorizzazione e promozione dell'ambiente, la divulgazione degli aspetti geologico ambientali del territorio. La partecipazione attiva alla divulgazione tecnico scientifica è attuata anche attraverso la pubblicazione di contributi su riviste professionali, specialistiche e pubblicazioni istituzionali.

ISBN 979-12-80811-04-2
9 791280 811042
90000 >
€ 39,90