



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



COPEMAP

*CO*astal *Pro*tection and *resili*Ence *MAP*ping in *Pro*TECTED areas

Mappatura della protezione costiera e della resilienza in aree protette



Relazione conclusiva

per ISPRA

Luca Parlagreco, Saverio Devoti, Andrea Bianco

per Università Politecnica delle Marche (paragrafo 4.5)

Lorenzo Melito, Maurizio Brocchini

per Università del Molise (capitolo 5)

Angelo Marucci, Davide Marino



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Prefazione a cura del PNC

- Sintesi sulle misure di finanziamento del MATTM in recepimento della direttiva biodiversità
- Motivazioni per cui le azioni “impatto antropico sulla duna” e “capacità difensiva dei fondali sabbiosi” sono importanti per il PNC
- tutto si inquadra nella visione di area vasta per cui i parchi sono sia deputati alla gestione del capitale naturale ma anche PRESIDI di conoscenza dello stesso



Indice generale

1. Introduzione e obiettivi.....	4
1.1 Le funzioni ecosistemiche del sistema spiaggia-dune-fondali.....	4
1.2 Si può quantificare l'effetto parco nei settori litoranei?.....	5
2. La gestione della costa.....	9
2.1 I contratti di costa quali possibili strumenti per una gestione sostenibile delle zone costiere.....	10
3. Le dimensioni del sistema spiaggia-dune-fondali dei siti COPEMAP nel contesto Italiano.....	14
4. La difesa del litorale: il ruolo dei fondali sabbiosi.....	19
4.1 Il litorale del PNC.....	23
4.1.1 Siti di video-monitoraggio costiero nel PNC.....	26
4.1.2 L'andamento di lungo termine della spiaggia del PNC.....	36
4.1.3 Considerazioni conclusive.....	39
4.2 Il litorale del PNG.....	41
4.2.1 Siti di video-monitoraggio costiero nel PNG.....	42
4.2.2 L'andamento di lungo termine della spiaggia del PNG.....	44
4.2.3 Considerazioni conclusive.....	47
4.3 Il litorale del AMP-TDC.....	48
4.3.1 Siti di video-monitoraggio costiero nel AMP-TDC.....	48
4.3.2 L'andamento di lungo termine della spiaggia del AMP-TDC.....	50
4.3.3 Considerazioni conclusive.....	52
4.4 Comparazione delle risultanze sui siti.....	53
4.5 La simulazione del servizio ecosistemico di protezione costiera.....	58
5 Il bilancio ambientale.....	65
6 Conclusioni e raccomandazioni gestionali.....	66
7 Riferimenti bibliografici.....	67



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



1. Introduzione e obiettivi

1.1 Le funzioni ecosistemiche del sistema spiaggia-dune-fondali

Gli ambienti costieri sono, sin dall'antichità, alcuni tra i luoghi più importanti per lo sviluppo e il benessere delle società umane, sia per la disponibilità di alimenti ricavati dall'esercizio della pesca che per le possibilità di utilizzare le coste come base di collegamento per trasporti e gli scambi commerciali. Ancora oggi lungo le coste si concentra la maggior parte degli insediamenti abitativi e, nonostante le importanti pressioni cui sono sottoposte, ospitano alcuni tra gli habitat naturali più importanti. Essi sono una importante fonte di alimenti e materie prime fondamentali e sostengono attività economiche come la pesca, l'acquacoltura e il turismo.

Le zone costiere forniscono quindi dei servizi fondamentali per la società che includono beni e prodotti commerciabili, come la pesca e le opportunità ricreative, e servizi non commercializzati, come la regolazione del clima, dei rischi naturali, il ciclo dei nutrienti solo per citarne alcuni. Tali servizi, operanti indipendentemente dalla volontà dell'uomo, sono chiamati **servizi ecosistemici** e convenzionalmente raggruppati in tre categorie:

1. approvvigionamento (ad esempio il servizio di approvvigionamento offerto dal mare, fornendoci appunto cibo);
2. regolazione e mantenimento (ad esempio il servizio di regolazione del clima offerto da una foresta, fornendoci ossigeno e sequestrando anidride carbonica);
3. culturali (ad esempio il servizio estetico offerto da un paesaggio naturale, fornendoci salute *psico-fisica* e quindi incentivando la frequentazione/fruizione di un luogo naturale).



Un litorale sabbioso, considerato nella sua interezza fisica composto di dune, spiaggia e fondali, fornisce principalmente:

- a) un servizio di **regolazione dell'erosione costiera**;
- b) una serie di servizi **culturali ed estetici** legati alla fruizione del paesaggio costiero, connessi all'economia delle località costiere.

Nel progetto COPEMAP è stata sperimentata una quantificazione di tali servizi, secondo il seguente modello concettuale:

1. la descrizione quantitativa della **capacità di protezione costiera** offerta dai fondali sabbiosi;
2. la **contabilizzazione dei benefici economici** complessivamente forniti da una spiaggia.

È stato sviluppato un metodo con il tentativo di quantificare l'**Effetto parco** in alcune aree naturali protette:

- Parco Nazionale del Circeo, di seguito PNC;
- Parco Nazionale del Gargano, di seguito PNG;
- Area Marina Protetta di Torre del Cerrano, di seguito AMP-TDC.

Alcune analisi sono state necessariamente condotte anche nei settori immediatamente limitrofi alle aree per un opportuno confronto delle risultanze.

1.2 Si può quantificare l'effetto parco nei settori litoranei?

Il concetto di **effetto parco** viene principalmente utilizzato in ambito economico con l'obiettivo di dimostrare l'importanza della conservazione del capitale naturale in termini economici. I parchi naturali non rappresentano esclusivamente uno strumento di conservazione e tutela ambientale, ma anche una **risorsa economica** importante.

In questo progetto il concetto di **effetto parco** ha avuto un'ulteriore declinazione derivante dalle esternalità positive indotte dalle politiche di conservazione del capitale naturale che, nel quadro normativo nazionale, hanno contribuito a ridurre la trasformazione del paesaggio costiero e di tutti i processi naturali che in esso si sviluppano.

La politica di rilancio economico avviata nel dopoguerra ha di fatto avviato un'intensificazione dello sfruttamento delle risorse naturali che, in particolar modo nella fascia costiera, è andato aumentando sempre più. La conseguente crescita economica delle attività insistenti sui litorali ha contestualmente visto aumentare la **richiesta di protezione degli asset economici che andavano crescendo sul territorio costiero**. La risposta di difesa della costa ha progressivamente modificato, irrigidendolo, il paesaggio costiero, spesso in contesti "emergenziali" tali per cui gli interventi non hanno subito un iter pianificatorio. Tali trasformazioni, e il conseguente **depauperamento delle risorse naturali**, sono state arginate esclusivamente nelle **aree naturali protette**. Nello specifico, le



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



aree naturali protette rappresentano le uniche porzioni di territorio in cui sono rimasti inalterati, o semi-inalterati gli equilibri tra paesaggio, flora e fauna. *Nello specifico, nelle aree naturali protette costiere tali equilibri si traducono primariamente nell'equilibrio tra habitat e dinamica sedimentaria litoranea.*

Attualmente le aree naturali protette sono l'unico luogo litoraneo dove è *preservata la spiaggia naturale*, ovvero una spiaggia:

- contraddistinta da un modesto quantitativo di sabbia perché spesso associata ad un **retrospiaggia sabbioso più o meno esteso**, con o senza apparati dunali;
- contraddistinta da una **mobilitazione autonoma del sedimento**, ovvero da dinamiche sedimentarie che non risultano confinate da strutture rigide sulla spiaggia e lungo il litorale;
- contraddistinta da una **morfologia complessa** la cui variazione nel tempo può agire con ampiezze molto importanti, ovvero una spiaggia può “*sparire e ritornare*” nel giro di pochi mesi o settimane;
- contraddistinta da un **paesaggio bello e piacevole da frequentare** e comprensivo di flora e fauna.

Per facilitare la comprensione dell'approccio utilizzato per indagare l'**Effetto Parco in settori litoranei**, ovvero per indagare la **relazione causale tra capacità di difesa costiera, trasporto/disponibilità di sedimenti e grado di antropizzazione costiero** si riportano alcuni semplici concetti di carattere *geologico, sedimentario e geomorfologico* a cui si farà necessariamente riferimento.

Una spiaggia può considerarsi un sistema in equilibrio se in grado di ripristinare lo stato originario a seguito di un evento perturbativo. Durante una mareggiata si osserva comunemente una *perturbazione* dell'ampiezza di spiaggia, spesso una diminuzione, dovuta ad uno *spostamento* di sedimento verso settori più profondi. L'aumento delle onde, sommergendo un porzione maggiore di arenile, induce un allargamento dell'areale di sedimenti mobili, che quindi vengono **redistribuiti** verso i fondali prospicienti, non propriamente persi. Tale spostamento produce a sua volta una *modifica del profilo di spiaggia*, meno pendente e in grado di offrire una superficie maggiore per il frangimento delle onde e quindi indebolire la forza con cui raggiungerebbero la riva. L'effetto di un evento perturbativo (mareggiata) su una spiaggia non si limita quindi alla diminuzione dell'ampiezza ma **rappresenta un meccanismo naturale di accomodamento per aumentare la capacità di protezione della spiaggia stessa e del litorale retrostante allo specifico evento perturbativo.**

Il ruolo della sabbia per una spiaggia è paragonabile a quello del sangue per gli animali o della linfa per le piante. L'efficacia dei processi di adattamento di una spiaggia, basati sulla sua capacità di cambiare forma, è quindi strettamente legata alla disponibilità e alla mobilità del sedimento. Indubbiamente una spiaggia non può avere una riserva di sabbia infinita, neanche in presenza di un



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



sistema dunale alle spalle. Per tale motivo la **disponibilità** di sedimento a costa è garantita dalla presenza dei *fiumi*, mentre la **distribuzione lungo costa** è legata alla **mobilità dei sedimenti** ad opera dalle correnti marine generate da vento, onde e maree.

In linea generale e in un contesto indisturbato, una singola spiaggia può contare su una riserva di sabbia propria, e all'occorrenza, di una accessoria (perché libera di essere trasportata) lungo il litorale in cui essa si sviluppa.

Ne consegue che qualsiasi meccanismo di ri-equilibrio di un sistema spiaggia non può che inquadarsi in un contesto territoriale e paesaggistico contraddistinto da **confini funzionali**, ovvero confini entro cui la sabbia viene immessa nel litorale e si muove in funzione del clima meteo marino locale. La presenza di tali confini, risultanti da tutte le forme o strutture aggettanti a mare, induce una **compartimentazione** della mobilità del sedimento, ovvero rende¹ **non comunicanti** dal punto di vista sedimentario due tratti litoranei adiacenti. Di conseguenza, l'aumento della presenza di tali confini, ad esempio di natura antropica per la costruzione di strutture rigide sulla costa, *aumenterà la compartimentazione del litorale e quindi inibirà la mobilità di sedimento lungo costa.*

Attualmente, la quantità di sedimento disponibile per le dinamiche costiere è in forte diminuzione in quanto la capacità di trasporto di sedimento da parte dei fiumi è stata fortemente compromessa sia per la costruzione di opere di regimazione idraulica che intrappolano il sedimento lungo gli alvei, sia per la diminuita produzione di suoli sui versanti legata all'impermeabilizzazione e protezione dei terreni. ***I litorali di oggi si trovano a dover "lavorare" con un quantitativo di sabbia limitato e che non riesce a distribuirsi omogeneamente su un litorale sempre più frammentato.***

La relazione tra salute di una spiaggia, disponibilità e mobilità di sedimento è quindi molto influenzata dal grado di frammentazione o compartimentazione della costa, *ovvero da quanto spesso viene interrotta la continuità laterale con cui la sabbia può muoversi lungo costa.* È quindi semplice comprendere che l'aumento della frammentazione costiera dovuto alla costruzione di opere di ingegneria per la protezione della costa ha influenzato più o meno velocemente il trasporto del sedimento, e continuerà a farlo. *La circolazione sanguigna dei litorali è stata quindi irrimediabilmente compromessa e la loro capacità di protezione fortemente indebolita. È altrettanto semplice comprendere perché le maggiori criticità erosive siano prossime a tutti i tratti costieri più antropizzati.*

Le spiagge sabbiose afferenti alle **aree naturali protette** rappresentano non solamente un presidio per la conservazione della **biodiversità** ma anche le ultime porzioni di territorio in cui la **funzione di protezione dei litorali è autonomamente garantita dall'interazione tra habitat e dinamica sedimentaria**. Tale capacità, in quanto relazionata a sistemi naturali, non è da intendere come una capacità di difesa offerta da una falesia che costantemente nel tempo fronteggia le onde. La protezione offerta da una spiaggia, proprio perché legata alla sua capacità di adattarsi alla mutevolezza del clima meteo-marino si esplica in maniera **non rigida**. Si introduce quindi il

1 Per la aggiornata delle condizioni di mare.



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



concetto di **resilienza**, ovvero la capacità di un sistema di assorbire le perturbazioni adattandovisi per poi ripristinare una condizione simile alla precedente al termine dell'evento perturbativo.

La capacità di ripristinare la condizione precedente è funzione dell'entità dell'evento perturbativo e del tempo necessario a ripristinare lo stato originario, caratteristico per ogni sistema.

Come descritto precedentemente, in ambito costiero un evento perturbativo ondoso genera sul sistema spiaggia una mobilitazione di una certa quantità di sedimento per diminuire l'impatto stesso dell'evento sulle funzionalità del sistema, ovvero preservare la **capacità resiliente**. La quantità di materiale che riuscirà a muoversi liberamente sulla spiaggia e lungo il litorale contribuirà a diminuire o aumentare la capacità **resiliente della spiaggia, in particolare:**

- *una diminuzione della capacità resiliente sarà tipica di litorali in cui il sedimento mobilizzato durante le mareggiate non sia successivamente rimpiazzato da altro disponibile lungo costa, generalmente perché molto compartimentata;*
- *un aumento della capacità resiliente sarà tipica di litorali in cui il sedimento mobilizzato durante le mareggiate sia attivamente rimpiazzato da altro disponibile lungo costa, generalmente perché poco compartimentata.*

La **capacità di offrire protezione nel tempo** è quindi una caratteristica che si basa sulla **disponibilità e mobilità di sedimento** lungo costa, ovvero **della capacità di garantire trasformazioni di adattamento nel tempo, ovvero la resilienza**.

La comprensione della **capacità resiliente di un sistema**, esplicandosi principalmente in una **dimensione temporale**, richiede una metodica di analisi in grado di produrre dati confrontabili non solamente nel lungo periodo ma anche alla scala dei singoli eventi perturbativi per indagare le velocità di riassorbimento delle perturbazioni stesse. Nel progetto COPEMAP è stato utilizzato il video-monitoraggio costiero con l'obiettivo di indagare tale caratteristica nei sistemi spiaggia; la tecnica utilizzata consente di osservare la velocità dei fenomeni perturbativi con elevata frequenza temporale (dati orari) e per lunghi intervalli di analisi (almeno 3 anni).

Ad integrazione dei dati puntuali derivanti dal video-monitoraggio costiero e con l'obiettivo di indagare la variabilità della **capacità resiliente di un sistema lungo i litorali**, sono stati utilizzati i dati satellitari Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel 2 per analizzare le modalità evolutive della linea di riva nel lungo periodo (2000-2021) delle falcate litorali in cui sono presenti le stazioni di video-monitoraggio.

In sintesi gli obiettivi analitici del progetto sono:

- a) la stima dell'andamento spaziale e temporale della resilienza dei litorali di studio, ovvero **l'effetto parco**;
- b) fornire una valutazione scientifica dell'ipotesi che **difendere un litorale resiliente sia meno costoso nel lungo termine se esso venga riconosciuto come tale**.



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



2. La gestione della costa

Quando si parla di coste non si può non tenere conto delle relazioni di mutua interdipendenza che legano tra di loro le relative componenti *ambientali*, *economiche* e *sociali*. Basti pensare per semplicità a un qualsiasi corso d'acqua, o anche a un tratto di costa, qualsiasi azione che venga esercitata su di esso/essa, produce ripercussioni a cascata, a volte anche non proporzionali, su tutte le componenti ambientali e socio economiche ad esso collegati.

Le tematiche in gioco, la complessità e la *stratificazione degli interessi coinvolti*, richiedono pertanto che le problematiche dei territori costieri vengano affrontate attraverso il superamento delle soluzioni che non tengono nella debita considerazione le interazioni reciproche che legano i servizi idrici, la difesa del suolo, gli ecosistemi, l'agricoltura, la pesca, le attività produttive, lo sviluppo dei centri abitati, ecc.. La gestione degli ambienti costieri, data la loro natura di sistemi *socio-ecologici complessi*, richiede quindi un *approccio sistemico*.

È perciò necessario un cambiamento del paradigma di gestione/tutela delle coste. Sono richieste modalità d'intervento che vadano oltre la mera opposizione di vincoli agli utilizzi delle risorse e vanno ricercate soluzioni che tengano conto della complessità intrinseca delle problematiche in gioco. Ovviamente tenendo conto che ci si muove all'interno di un campo, quello della pianificazione e gestione del territorio, in cui vi è già una stratificazione ipertrofica di strumenti di pianificazione, di legislazione e di soggetti competenti a rilasciare pareri. Non c'è quindi la necessità di affollare ulteriormente il quadro regolatorio attraverso l'introduzione di nuovi strumenti di pianificazione, vi è piuttosto l'esigenza di *aiutare i soggetti istituzionali*, con ruoli e responsabilità definite, ***ad assumere soluzioni che tengano conto della complessità dei problemi***, e in ultima istanza aiutare gli attori in campo nell'assunzione e nell'attuazione di decisioni migliori.



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



2.1 I contratti di costa quali possibili strumenti per una gestione sostenibile delle zone costiere

In questo senso, quindi, gli strumenti partecipativi, come ad esempio i **contratti di costa**, possono essere visti come un utile **strumento per affrontare la gestione e la tutela delle coste e dei relativi bacini idrografici afferenti** da una prospettiva molto più articolata e sfaccettata del normale, chiamando gli **attori locali alla costruzione attiva di politiche pubbliche più efficienti ed efficaci**, contribuendo per questa via alla **resilienza stessa dei corpi idrici e dei territori ad essi afferenti**.

I contratti di costa afferiscono alla categoria più ampia del contratto di fiume (che può essere declinata anche in altre diverse categorie contrattuali quali appunto i contratti di costa, di lago, di falda, di foce, ecc.) per il quale nell'ambito del World Water Forum nel 2000, è stata data la seguente definizione << è un accordo che permette di adottare un sistema di regole in cui criteri di partecipazione, sostenibilità, consapevolezza e responsabilità intervengono in modo prioritario nella ricerca di soluzioni efficaci per la riqualificazione di un bacino fluviale e la difesa idraulica del territorio >>.

Gli elementi che entrano in gioco quando si parla dei **contratti di costa** (di fiume, di foce, ecc.) sono:

- **la comunità** e gli attori che agiscono e operano sul territorio, con competenze diverse e con aspettative e finalità alle volte anche conflittuali;
- **il territorio**, come sistema *socio-ecologico* complesso fatto di suolo, di acque (acque marino-costiere, fiumi, foci, laghi, falde, ecc.) ma anche di insediamenti, di attività economiche, di attori economici, sociali e politici;
- **un insieme di politiche ed i progetti** che agiscono su questo territorio a diverse scale e livelli.

Tra gli **obiettivi strategici dei contratti** figurano:

- ✓ **la promozione della qualità delle acque e degli ambienti ad essi connessi**, la sicurezza idraulica del territorio, attraverso l'adozione di un partenariato tra soggetti pubblici e privati;
- ✓ **l'affermazione del ruolo di governo del sistema delle Istituzioni e delle Autonomie locali** che vada oltre alla definizione di norme e piani, per coinvolgere in azioni condivise gli utenti del "sistema costiero" per il raggiungimento di obiettivi e la definizione di strategie e progetti elaborati in accordo;
- ✓ **la promozione dell'accesso alle informazioni ambientali a tutti gli utenti**, quale base per sviluppare una sensibilità e una condivisione delle strategie di intervento;
- ✓ **la promozione e diffusione della cultura del territorio e dell'ambiente**, sia sotto l'aspetto etico che cognitivo, sollecitando e permettendo una piena partecipazione dei cittadini alle



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



iniziative volte alla valorizzazione, alla tutela e all'utilizzo razionale delle risorse ambientali marino-costiere.

Sottoscrivendo un contratto di costa i soggetti ne accettano anche le **regole** e, in particolare, il fatto che i principi, gli indirizzi e le misure previsti dal Contratto, dal suo scenario strategico e dal programma d'azione, costituiscono il principale riferimento per le pianificazioni e programmazioni territoriali di qualsiasi livello e loro varianti, nonché per i regolamenti locali. I soggetti sottoscrittori condividono il principio che solo attraverso una sinergica e forte azione di tutti i portatori di interesse, pubblici e privati, si possa invertire la tendenza al degrado territoriale/ambientale degli ambienti costieri e dei bacini fluviali e perseguire adeguatamente obiettivi di sviluppo più orientati alla sostenibilità e al bene comune. A tal fine i sottoscrittori si impegnano, nel rispetto delle competenze di ciascuno, ad operare in un quadro di forte valorizzazione del principio di sussidiarietà, attivando tutti gli strumenti partenariali utili al pieno raggiungimento degli obiettivi condivisi.

Il Contratto fa propri i principi comunitari di partecipazione democratica alle decisioni, che costituiscono l'asse portante del Trattato di Lisbona: quali processi partecipati territoriali colgono appieno quella **dimensione regionale e locale** che l'Unione Europea intende indagare con le consultazioni e riflettere nelle proprie proposte legislative. In particolare, si ispira al principio di sussidiarietà orizzontale e verticale e al principio dello sviluppo locale partecipato: in quanto processo di *governance* che fa riferimento ad un approccio ecosistemico, deve fare leva sulla **responsabilità della società insediata**, che riconosce nel bacino idrografico/zona costiera di riferimento una delle matrici della propria identità culturale.

Con il Contratto si contribuisce a sperimentare un nuovo sistema di **governance** per uno sviluppo sostenibile, che passa inevitabilmente attraverso un approccio integrato tra politiche di sviluppo e di tutela ambientale.

Un ruolo rilevante viene riconosciuto al Contratto di costa anche in relazione alle strategie di adattamento ai cambiamenti climatici per i corpi idrici e più in generale i bacini idrografici – su cui si palesano, con manifestazioni sempre più eclatanti, gli effetti locali dei cambiamenti climatici e che rappresentano lo snodo territoriale su cui si concentrano gli interessi legittimi dei diversi attori territoriali e la regolazione dei conflitti, unita alla necessità di assumere decisioni che garantiscano territori e bacini idrografici realmente resilienti.

Proprio per la sua natura di processo condiviso continuo, il Contratto di costa non ha un termine temporale prefissato, ma resta in essere fino a che rimane viva la volontà di aderirvi da parte dei soggetti sottoscrittori.

Essi, nel sottoscriverlo, si impegneranno al raggiungimento degli obiettivi di cui sopra, ciascuno per le proprie competenze e responsabilità e mediante l'impegno delle proprie disponibilità umane e finanziarie.



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



I riferimenti dei *contratti di fiume* in Italia sono costituiti dalla *Carta nazionale dei Contratti fiume*, dall'*articolo 68 bis del D.Lgs. 152/2006* e le *linee guida sui criteri di qualità dei contratti di fiume* introdotti nel marzo del 2015 dal *Tavolo Nazionale dei Contratti di fiume*, che ha svolto un ruolo molto importante per la conoscenza e la diffusione di questo strumento di **governance** partecipata su tutto il territorio nazionale.

Un elemento caratterizzante gli strumenti riconducibili alla tipologia generale del contratto di fiume (e dunque anche dei contratti di costa) è rappresentato dal fatto che ***l'avvio del processo è volontario***. I soggetti aderenti a un contratto decidono di agire autonomamente e definiscono un programma d'azione che si impegnano ad attuare nell'arco di un determinato arco temporale.

Pur nella loro volontarietà l'art. 68 bis del D.lgs. 152/2006 – che introduce i contratti di fiume nell'ordinamento giuridico nazionale – definisce i *contratti di fiume* come strumenti che *<<concorrono alla definizione e all'attuazione degli strumenti di pianificazione di distretto a livello di bacino e sottobacino idrografico, quali strumenti volontari di programmazione strategica e negoziata che perseguono la tutela, la corretta gestione delle risorse idriche e la valorizzazione dei territori fluviali, unitamente alla salvaguardia dal rischio idraulico, contribuendo allo sviluppo locale di tali aree>>*. Ne consegue che i contratti si configurano come strumenti di attuazione della pianificazione distrettuale, nella doppia accezione di tutela delle acque e di gestione del rischio idraulico e difesa del suolo; ne consegue inoltre che i contratti di fiume non vanno interpretati come nuovi livelli di programmazione bensì come strumenti attuativi della pianificazione distrettuale.

Prendendo a riferimento la *direttiva quadro* sulle acque e la *direttiva alluvioni* – ove la prima ha come finalità il risanamento e/o la tutela dei copri idrici mentre la seconda la corretta gestione del territorio al fine di ridurre il rischio d'alluvione – può accadere che le misure da esse promosse se non adeguatamente coordinate tra di loro rischiano di entrare in conflitto concorrendo negativamente al raggiungimento dei reciproci obiettivi.

In tale contesto assume una grande importanza la necessità di operare un elevato livello di integrazione delle diverse politiche – e delle misure che ne discendono – da attuare anche attraverso la partecipazione e l'interazione dialettica e discorsiva tra i diversi attori che prendono parte ai processi decisionali. Al fine di evitare tutto ciò il legislatore comunitario ha riconosciuto una grande importanza alla costruzione partecipata della pianificazione distrettuale, riconoscendo implicitamente un ruolo di spicco ai processi partecipativi nella costruzione dal basso delle politiche distrettuali.

Come è noto la *Direttiva quadro sulle acque* (2000/60/CE) e la *Direttiva per la gestione del rischio alluvioni* (2007/60/CE) delineano un assetto del territorio che, attraverso l'*Autorità di Bacino Distrettuale*, fa perno sul *Distretto Idrografico* quale ambito territoriale d'area vasta di riferimento dei piani che definiscono da una parte, le politiche di tutela (*Piano di gestione delle acque*) e dall'altra, le politiche di gestione idraulica del territorio (*Piano di gestione del rischio alluvione*). I



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



livelli territoriali di riferimento per la definizione delle misure e delle azioni dei predetti piani va dal *bacino idrografico* fino ad arrivare al singolo *corpo idrico*.

In questo quadro, i contratti di costa possono diventare un efficace strumento di attuazione delle politiche distrettuali sia di tutela degli ambienti idrici che di gestione idraulica del territorio anche ai fini di gestione del rischio alluvione. Di converso gli stessi contratti costa possono contribuire a definire dal basso anche le politiche di livello distrettuale, attraverso l'azione degli attori locali che intervengono nel processo decisionale in virtù della loro maggiore vicinanza ai problemi di un bacino idrografico (di un sotto-bacino o di un corpo idrico costiero). In questa doppia accezione, i contratti di fiume si configurano come un livello intermedio di partecipazione, che da una parte contribuisce con piena corresponsione di responsabilità, all'attuazione delle politiche definite negli strumenti d'area vasta, dall'altra, invece, può contribuire a costruire dal basso le predette politiche di livello superiore (distrettuali).

Durante l'ultima fase di scrittura della presente nota gli scriventi sono stati informati dell'avvenuta redazione di un documento strategico nell'ambito dell'avvio del processo di Contratto di Costa dell'Agro Pontino, sviluppato nell'ambito del progetto europeo "Coasting", Coastal Integrated Governance for sustainable tourism.

Non è stato possibile quindi integrare alcuni aspetti importanti proposti nel suddetto documento all'interno di questa nota.



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



3. Le dimensioni del sistema spiaggia-dune-fondali dei siti COPEMAP nel contesto Italiano

Nell'ottica di poter evidenziare l'importanza che assume l'estensione di un'area parco, le aree di studio sono state caratterizzate in funzione della distribuzione sul rispettivo territorio litoraneo dei siti appartenenti alla rete europea Natura2000, il principale strumento della politica dell'Unione Europea per la conservazione della biodiversità.

Si tratta di una rete ecologica diffusa su tutto il territorio dell'Unione, istituita ai sensi della *Direttiva 92/43/CEE "Habitat"* per garantire il mantenimento a lungo termine degli habitat naturali e delle specie di flora e fauna minacciati o rari a livello comunitario. La rete Natura 2000 è costituita dai Siti di Interesse Comunitario (SIC), identificati dagli Stati Membri secondo quanto stabilito dalla *Direttiva Habitat*, che vengono successivamente designati quali Zone Speciali di Conservazione (ZSC), e comprende anche le Zone di Protezione Speciale (ZPS) istituite ai sensi della *Direttiva 2009/147/CE "Uccelli"* concernente la conservazione degli uccelli selvatici. Le aree che compongono la rete Natura 2000 non sono riserve rigidamente protette dove le attività umane sono escluse; la *Direttiva Habitat* intende garantire la protezione della natura tenendo anche "conto delle esigenze economiche, sociali e culturali, nonché delle particolarità regionali e locali".

A tal fine, e con l'obiettivo di caratterizzare la densità dei siti della Rete Natura2000 sul territorio litoraneo, è stata condotta un'analisi su due porzioni di territorio:

- un areale ampio 1000m e centrato sulla linea di riva a testimonianza della densità dei siti in un intorno molto prossimo della linea di riva e quindi rappresentante il contributo del settore propriamente di spiaggia, denominato **buffer500** (si veda figura 1), alla valenza naturalistica costiera;

- un areale ampio 7000m e centrato sulla linea di riva a testimonianza della densità dei siti in un intorno più ampio della linea di riva e quindi rappresentante il contributo del settore di litoraneo, denominato **buffer3500** (si veda figura 2), alla valenza naturalistica della costa;

L'analisi è stata condotta su tutto il litorale Italiano (figura 3) e sono state prodotte alcune statistiche descrittive e aggregate sia per regione, che per i siti stessi delle aree in esame (figura 4 e 5).

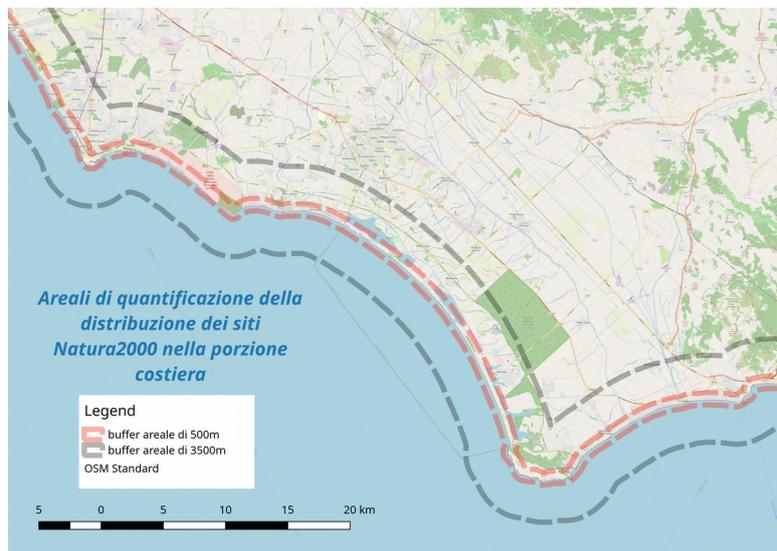


Figure 1. Metodica utilizzata per calcolare la densità di siti della rete Natura2000 sul territorio litoraneo.

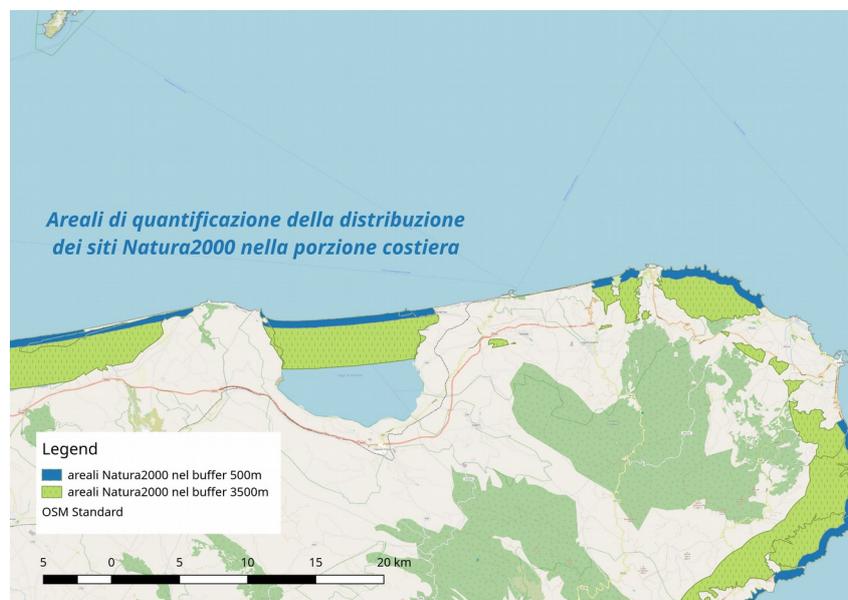


Figure 2. restituzione della quantificazione degli areali appartenenti alla rete Natura2000. Esempio del PNG.



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente

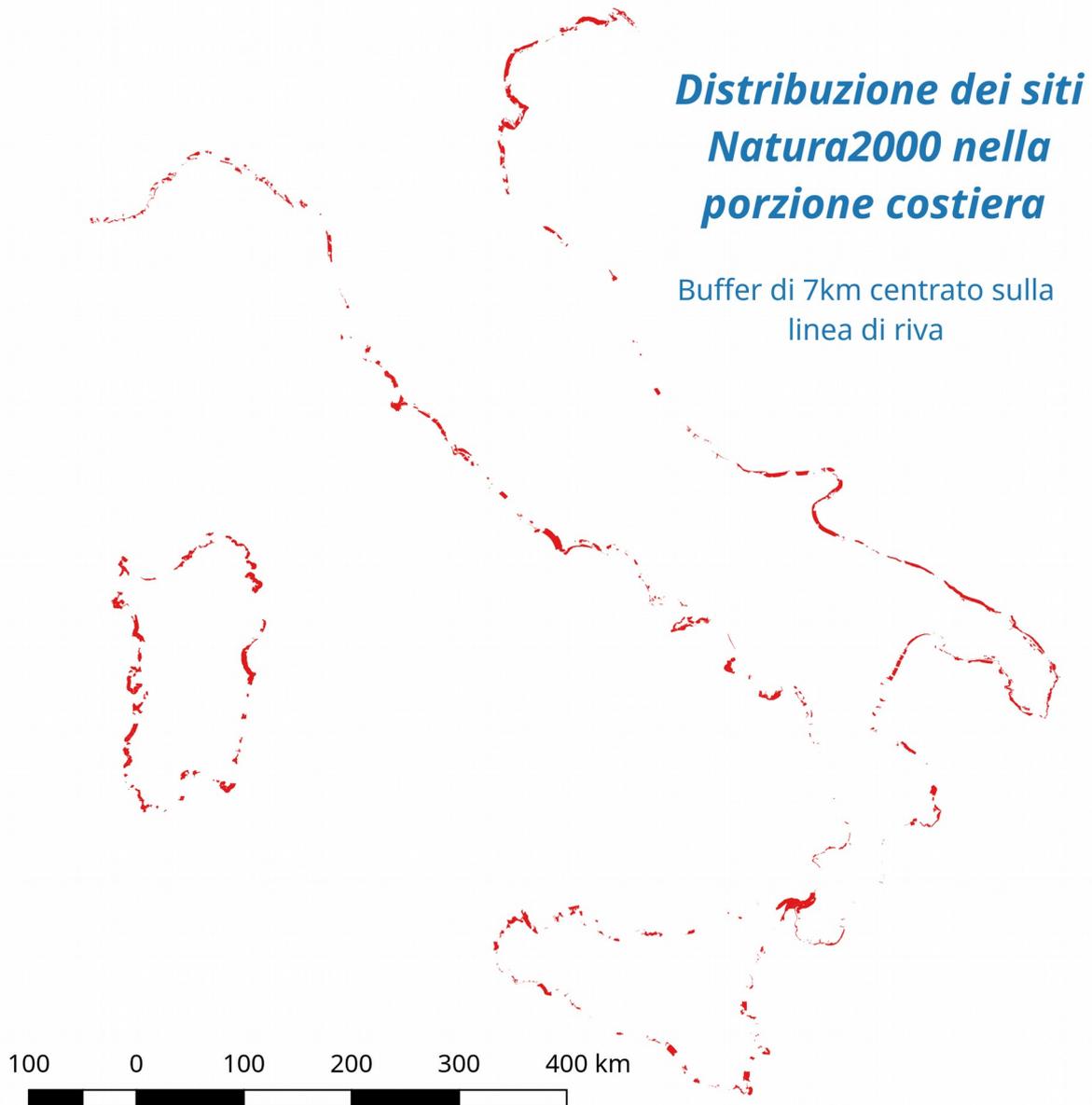


Figure 3. Distribuzione nazionale dei siti appartenenti alla rete Natura2000 nella fascia litoranea.



Le statistiche riportate nelle figure 4 e 5 inquadrano l'importanza naturalistica delle aree prescelte nello studio, in particolare risulta evidente che:

- i Parchi Nazionali del Circeo e del Gargano rappresentano circa il 3% della distribuzione litoranea nazionale dei siti della rete Natura2000 nelle fasce litoranee e di spiaggia, rispettivamente 3500 e 500;
- il contributo del Parco Nazionale del Circeo supera il 50% della distribuzione regionale, evidenziando quindi l'importanza naturalistica dello stesso alla scala regionale, oltre che nazionale ;
- il contributo dell'Area Marina Protetta di Torre del Cerrano rappresenta oltre il 30% della distribuzione regionale nella fascia di spiaggia (buffer500), e si attesta ad oltre il 50% nella fascia litoranea (buffer3500) evidenziando quindi l'importanza naturalistica della stessa alla scala regionale e soprattutto nel settore marino;
- il contributo del Parco Nazionale del Gargano si attesta a circa il 20% della distribuzione regionale, sia nella porzione di spiaggia (buffer500) che litoranea (buffer3500) evidenziando l'importanza naturalistica dello stesso alla scala regionale, oltre che nazionale;

Valore naturalistico aree COPEMAP: dimensione Nazionale

	% rispetto dato nazionale di area NAT2000 in buffer 3500	% rispetto dato nazionale di area NAT2000 in buffer 500
Lazio	7,24	4,52
Abruzzo	0,50	0,53
Puglia	17,64	13,04
PNC	2,64	2,47
AMP	0,29	0,17
PNG	3,72	2,41

Figure 4. Densità areale percentuale dei siti Natura2000 rispetto al dato nazionale.

In sintesi, il dato fornito può fornire importanti spunti nel contesto di gestione del Capitale Naturale nell'area vasta, ovvero:

- ✓ l'importanza dei due Parchi Nazionali nella politica di conservazione e gestione del Capitale Naturale a livello nazionale, in quanto rappresentanti più del 2% di territorio nazionale appartenente alla rete Natura2000;



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



- ✓ l'importanza dell'AMP Torre del Cerrano nella politica di conservazione e gestione del Capitale Naturale a livello regionale in un contesto litoraneo, quale quello centro Adriatico, in cui la valenza ambientale e naturalistica risulta fortemente compromessa dalle politiche di fruizione del territorio litoraneo;
- ✓ le aree di studio contribuiscono al valore naturalistico regionale in una misura sempre maggiore del 20% del suolo litoraneo (regionale).

Valore naturalistico aree COPEMAP: dimensione Regionale

	% rispetto dato regionale di area NAT2000 in buffer 3500	% rispetto dato regionale di area NAT2000 in buffer 500
PNC	36,46	54,59
AMP	56,94	31,63
PNG	21,07	18,45

Figure 5. Densità areale percentuale dei siti Natura2000 rispetto al dato regionale.



4. La difesa del litorale: il ruolo dei fondali sabbiosi

La dinamica costiera

La mobilitazione dei sedimenti si esplica in maggior misura durante gli eventi di mareggiata, un monitoraggio degli impatti ondosi a costa dovrebbe pertanto essere in grado di:

1. acquisire informazioni con elevata frequenza temporale per analizzare modificazioni morfologiche ripetute nel tempo;
2. essere operativo durante gli eventi di mareggiata per analizzare i fenomeni che si sviluppano durante tali eventi;
3. essere operativo nel lungo termine (anni) per analizzare l'andamento temporale delle risultanze dei punti 1 e 2 e quindi fornire informazioni rappresentative di tutte le condizioni energetiche caratteristiche di un sito, e quindi risolvere eventuali **ciclicità comportamentali**.

L'osservazione come fonte di conoscenza

L'osservazione della morfologia della spiaggia e dei fondali rappresenta uno strumento indiretto per monitorare il quantitativo di sabbia che, movimentandosi ad opera del vento e delle onde, induce una modificazione della forma del **corpo sedimentario spiaggia**.

La possibilità di osservare tali modificazioni sia nella porzione emersa che sommersa fornisce uno strumento di *analisi quantitativa* dello scambio di sedimenti tra queste due porzioni e conseguentemente del rapporto causale tra morfologia dei fondali e fenomenologie erosive a costa.

Il video-monitoraggio costiero rappresenta una tecnica osservativa automatizzata che risponde alle specifiche sopra elencate. Si basa sull'utilizzo di videocamere digitali che, opportunamente posizionate sul litorale, forniscono **dati immagine** da cui è successivamente possibile estrarre il posizionamento planimetrico di alcuni descrittori della morfologia di spiaggia, come la linea di riva e la posizione delle morfologie che inducono il frangimento ondoso denominate **barre sabbiose sommerse**, altrimenti note come **secche**. È altresì possibile misurare anche alcuni descrittori del **campo idrodinamico sotto costa** responsabili della sommersione temporanea dell'arenile.



Il video-monitoraggio è definito un sistema osservativo “remoto”, ovvero in grado di misurare a distanza (quindi indirettamente) la dimensione di specifici fenomeni, ad esempio l’ampiezza di spiaggia altrimenti misurabile direttamente con una fettuccia metrica o con un GPS. Il valore aggiunto di tali tecniche remote, in quanto automatizzate, risiede nella capacità di misurare ripetutamente alcuni parametri nel tempo (ogni ora nel nostro caso) e per lunghi intervalli temporali (multi-annuale nel nostro caso). Nel corso degli ultimi 20 anni, tale metodologia ha di fatto fornito la possibilità di analizzare la variabilità morfologica della spiaggia in termini statistici e con metodiche tipiche dello studio di serie temporali continue e ad elevata frequenza di acquisizione derivate dall’oceanografia e dalla meteorologia.

Nel progetto COPEMAP sono state utilizzate, o installate ex-novo, le centraline di video-monitoraggio costiero appartenenti alla rete di video-monitoraggio costiero sviluppata da ISPRA-RVMC², la cui localizzazione ha garantito un’osservazione ad elevata risoluzione spaziale (circa 1 metro) di porzioni di litorale estese dai 500 ai 2000m in funzione soprattutto della quota di installazione³. Nella **tabella 1** è riportato il periodo di attività e **in figura 6** la localizzazione delle stazioni ISPRA utilizzate.

Localizzazione	Nome stazione	Periodo di attività						
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
PNC - Sabaudia	kufra							
AMP TDC - Pineto	TorreCerrano 01							
PNG – Rodi Garganico	rodi01 *							
PNC - Latina	fogliano01 *							
Usate per confronto								
Senigallia (AN)	senigallia01							
Terracina (LT)	torresole01							

Tabella 1. Periodo di attività dei sistemi di video-monitoraggio utilizzati.

Per tutti i siti di monitoraggio sono stati utilizzati i dati ondosi disponibili⁴, estratti nelle porzioni di mare prospicienti le singole stazioni (**figura 6**). Il dato ondoso è stato quindi elaborato per contestualizzare le variabilità morfologiche osservate al contestuale forzante idrodinamico. L’intervallo di attività delle videocamere, per il quale sono stati estratti i dati ondosi, ha garantito

2 Rete di Video-Monitoraggio Costiero -RVMC, <https://videomonitoraggio.isprambiente.it>

3 Generalmente, l’estensione delle aree osservabili con buona risoluzione aumenta al crescere della quota, l’estensione dei siti COPEMAP è descritta in Parlagreco et alii (2019).

4 Copernicus Marine Services - <https://marine.copernicus.eu/>

una buona rappresentatività del clima meteo-marino locale, ovvero per ogni sito è stato possibile confrontare l'andamento del sistema spiaggia per almeno tre stagioni invernali consecutive.

A completamento delle metodiche osservative locali, e per fornire **dati di lungo termine e di area vasta**, è stato analizzato l'andamento della linea di riva dal 2000-2021 tramite l'elaborazione delle immagini satellitari Landsat7 e Landsat8 del programma americano della Nasa⁵ e quelle Sentinel2 del programma europeo Copernicus⁶. Sono stati applicati moderni algoritmi di classificazione supervisionata alle immagini multispettrali per tracciare l'andamento della linea di riva, fondamentale per contestualizzare l'informazione puntuale ottenuta dai siti di video-monitoraggio in un quadro di area vasta. Successivamente all'estrazione della linea di riva dalle immagini, sono stati individuati alcuni transetti di misura (tabella 2) su cui è stato computato l'andamento della linea di riva dal 2000 al 2021 per ogni sito (figura 6).



Figure 6. Localizzazione dei transetti di misura del posizionamento della linea di riva estatto da immagini multispettrali satellitari.

5 <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>

6 <https://www.copernicus.eu/it>



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



	PNC	AMP	PNG
Num. transetti	62	31	63
Lunghezza tratto litorale (km)	28	17	18
Equidistanza media (m)	450	550	290

Table 2. Specifiche del piano di campionamento dell'andamento della linea di riva utilizzato.

4.1 Il litorale del PNC

Il PNC è delimitato verso mare da un litorale sabbioso che si estende per circa 25 km. L'orientazione e la pendenza della spiaggia varia da circa E-W e poco pendente nella porzione della “marina di Latina” a circa N-S e molto pendente nella porzione di Torre Paola.

L'andamento ricurvo del litorale, sebbene sia una falcata priva di discontinuità morfologiche, induce un comportamento “morfologico” della spiaggia tutt'altro che omogeneo, anzi differenziato in almeno due porzioni. È stata condotta un'analisi statistica per individuare la “soglia morfologica” che distingue i comportamenti del litorale, risultata essere localizzata presso il canale Caterattino⁷. In **figura 7** sono schematizzate le risultanze della suddetta analisi (*cluster analysis*) condotta sulla matrice di dati spaziali da cui sono stati estratti alcuni descrittori della morfologia di spiaggia e dei fondali con una spaziatura di 100m lungo costa. Nel pannello a) è riportato il risultato della *cluster analysis* (dendrogramma) e la conseguente suddivisione del *dataset* in due **cluster morfologici**, nel pannello b) il profilo medio dei due settori e nel pannello c) la distribuzione spaziale dei profili analizzati appartenenti ai due “*cluster morfologici*” individuati.

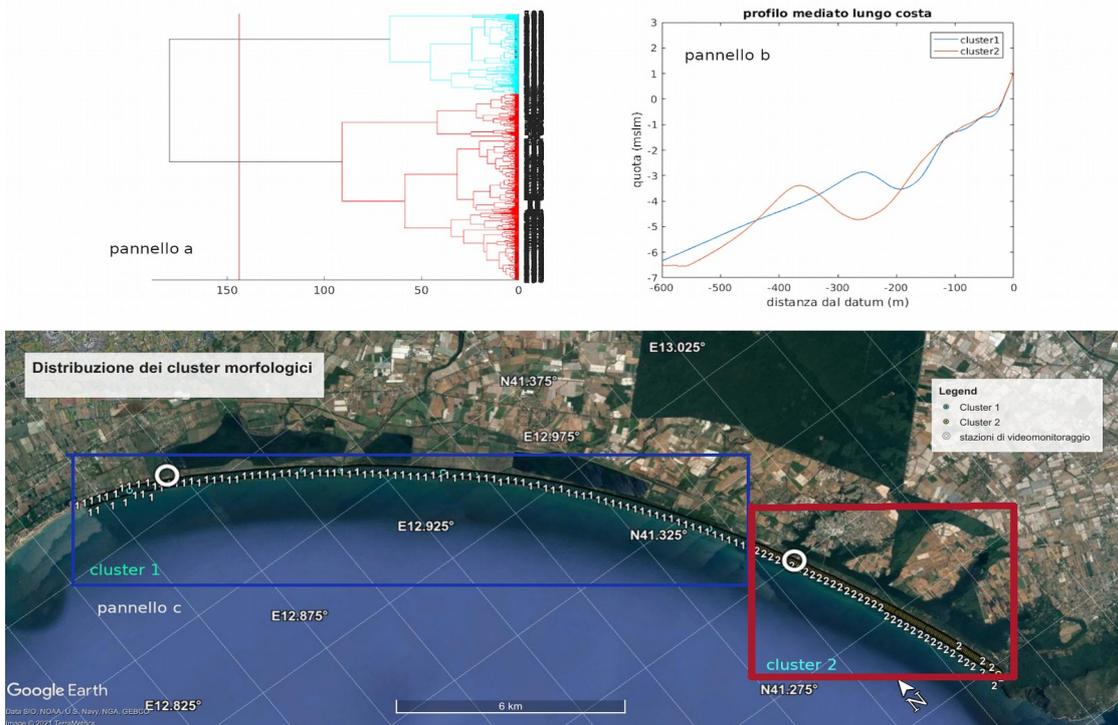


Figure 7. Cluster morfologici che descrivono il comportamento del litorale del PNC.

⁷ Fonte del dato: “Rilievo di Dettaglio Della Batimetria Costiera Laziale con Tecnologie Lidar e Valutazione Delle Caratteristiche Fisiche e Biologiche in Aree Marine Della Costa Laziale di Specifico Interesse Ambientale Fase 2- Caratterizzazione Morfologica; ISPRA: Rome, Italy, 2009; 120p”. La presente nota tecnica si è avvalsa del dtm-lidar elaborato nel 2009 da cui sono stati estratti profilo topo-batimetrici con un passo di 100m sul litorale indagato.



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Le caratteristiche morfologiche delle due porzioni di litorale sono sintetizzate in **tabella 3**, in particolare si riportano i valori minimi, medi e massimi dei parametri ampiezza di spiaggia emersa (**ase**), pendenza dei fondali (**slope**), distanza tra le barre (**distbar**), altezza massima duna (**maxdune**), profondità della cresta di barra esterna (**bardepth**) e l'angolo tra la direzione delle mareggiate principali e la normale alla spiaggia (**orientazione**).

[min,med,max]	PORZIONE NORD -CLUSTER1	PORZIONE SUD - CLUSTER2
ase (m)	[6.6, 11.8 ,25.0]	[5.9, 11.4 , 17.4]
slope	[0.0092, 0.0101 ,0.0113]	[0.0185, 0.0310 , 0.0592]
distbar (m)	[109.3, 149.5 , 226.9]	[141.5, 231.4 , 272.1]
maxdune (m slmm)	[3.5, 8.6 , 19.3]	[8.5, 15.5 , 20.3]
bardepth (m slmm)	[-3.2, -2.2 , -1.4]	[-3.9, -2.9 , -2.3]
orientazione (°)	[12.7, 43.8 , 68.6]	[32.8, 63.3 , 75.2]

Tabella 3. Distribuzione statistica dei parametri morfologici estratti dal dato lidar 2009.

A riprova della classificazione statistica è stato condotto il calcolo del parametro morfodinamico di Irribarren che classifica la spiaggia in base all'integrazione del dato di pendenza della spiaggia con la ripidità dell'onda (Battjes, 1974). I due tratti litoranei individuati sono caratterizzati infatti da una distribuzione di tale parametro (computato su una serie ondometrica di 10 anni, 2006-2016) sensibilmente differente (**figura 8**, pannello superiore).

È possibile quindi distinguere statisticamente le due porzioni utilizzando la distribuzione del parametro morfodinamico di Irribarren, nello specifico:

- la spiaggia della porzione Nord, durante le mareggiate, dissipa l'energia ondosa su un'ampia zona dei fondali, attivando di fatto una maggiore interazione tra quest'ultimi e la spiaggia;
- la spiaggia della porzione Sud, durante le mareggiate, tende a dissipare l'energia ondosa su porzioni dei fondali meno ampie e poco connesse tra loro, attivando di fatto una maggiore interazione tra la spiaggia e la porzione più superficiale dei fondali;

Un'altra differenza fondamentale tra i due tratti, funzione principale dell'andamento arcuato del litorale, è l'angolo con cui le onde incidono la costa (**figura 8, pannello inferiore**). A tale scopo è stato fissato un valore di incidenza delle onde (rispetto la normale alla spiaggia) pari a 30° come soglia tra ondatazioni che incidono ad alto angolo (>30°) e basso angolo (<30°), e quindi che rispettivamente aumentano o diminuiscono il potenziale trasporto sedimentario lungo costa. Tale

valore è stato calcolato sulla serie oraria ondosa 2006-2016 estratta dalla boa virtuale posizionata al centro del litorale.

Anche la distribuzione dell'obliquità ondosa, se calcolata per i settori Nord e Sud individuati dall'analisi cluster suddetta, assume una significatività statistica ed evidenzia che:

- nel settore nord il 56% delle onde incide il litorale con angoli maggiori della soglia di 30° e favorisce maggiormente lo sviluppo della componente di trasporto lungo costa;
- nel settore sud il 53% delle onde incide il litorale con angoli minori della soglia di 30° e favorisce maggiormente lo sviluppo della componente di trasporto trasversale a costa.

In sintesi, il tratto nord rifornisce il settore sud per la maggior parte di valori ondosi attraverso un "nastro trasportatore di sabbia" che si distribuisce in continuità tra la spiaggia e i fondali.

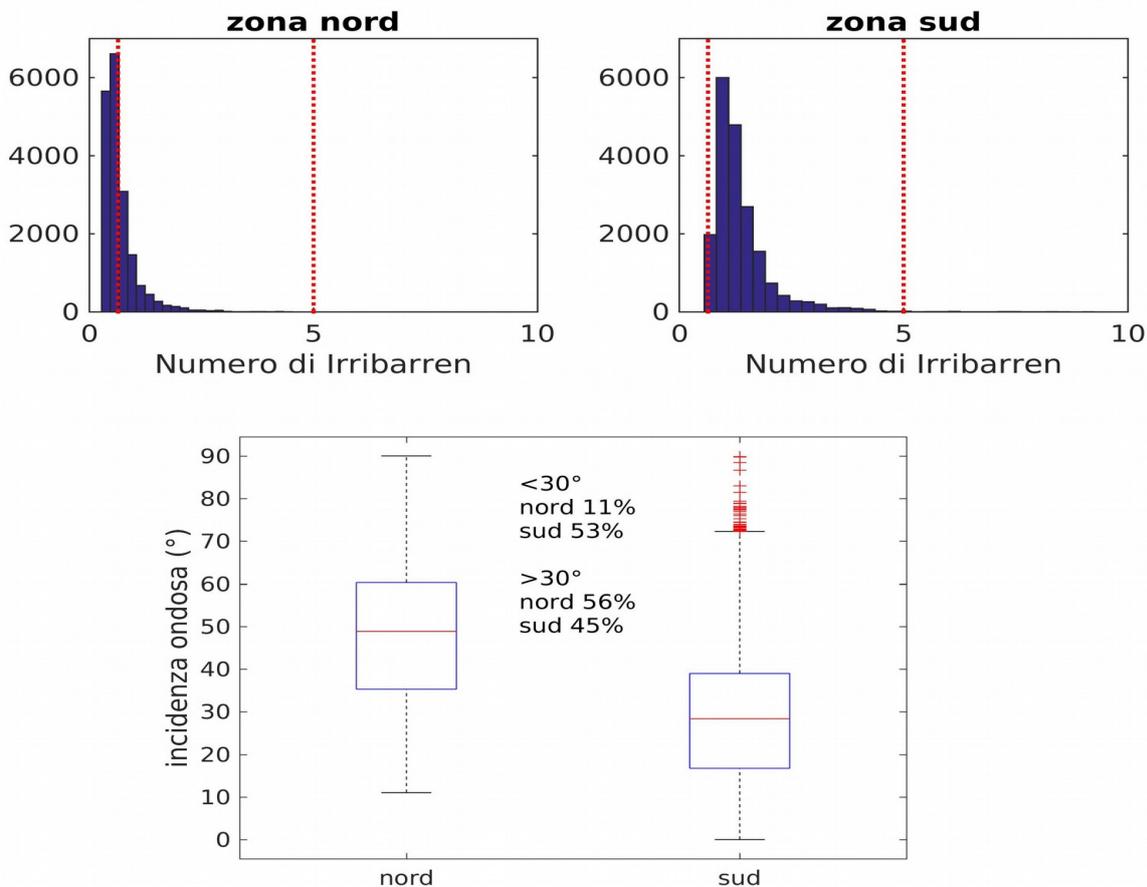


Figure 8. Pannelli superiori indicanti la distribuzione statistica del parametro di Irribarren in funzione di una serie temporale di 10 anni di dati ondometrici estratti dalla boa virtuale antistante il litorale del PNC, le linee rosse indicano le soglie tra tre stadi morfodinamici. Nel pannello inferiore la distribuzione statistica dell'obliquità ondosa calcolata per le due aree.

4.1.1 Siti di video-monitoraggio costiero nel PNC

A partire dal 2015 è stato avviato il monitoraggio di un tratto del litorale afferente alla porzione meridionale dell'area Parco con l'installazione di una centralina di video-monitoraggio presso la struttura alberghiera "Oasi di Kufra".

Le immagini risultanti, foto orto-rettificate del litorale, descrivono la morfologia di una porzione di 1200m del litorale che si estende dall'Oasi di Kufra verso Sud (figura 9). il sistema di riferimento è centrato sulla posizione della stazione (triangolo verde in figura 9) e ruotato in modo da far coincidere l'orientazione media della spiaggia con l'asse delle ascisse e quella trasversale con l'asse delle ordinate.

Nel 2019, nell'ambito del progetto COPEMAP, è stata installata una seconda stazione nel tratto settentrionale, presso la struttura alberghiera "Hotel Fogliano", la cui descrizione non verrà riportata nella presente discussione per mancanza di un opportuno intervallo temporale di osservazione.

Le immagini risultanti descrivono la morfologia di una porzione di circa 1500m del litorale che si estende dal Hotel Fogliano verso Sud.

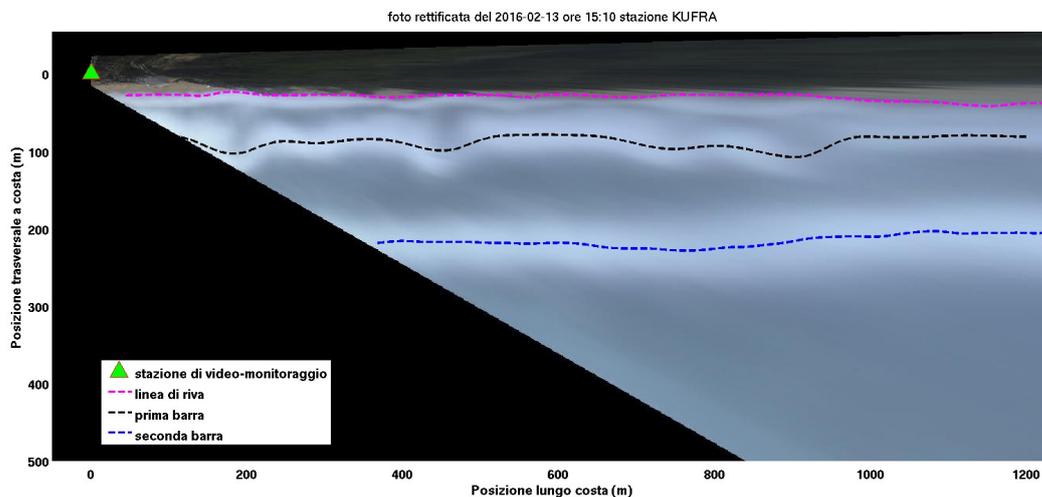


Figure 9. Vista orto-rettificata della stazione di video-monitoraggio di Kufra.

Il sistema spiaggia/fondali osservato dalla stazione Kufra

Partendo dalle risultanze dell'analisi cluster è stato possibile interpretare l'area prospiciente la stazione "Kufra" come rappresentativa del tratto meridionale del litorale del PNC, di seguito verranno descritte alcune caratteristiche salienti che contraddistinguono questo tratto del spiaggia.

La conformazione "a festoni" rappresenta la caratteristica distintiva più importante di questa porzione di litorale, ovvero una spiaggia in cui l'ampiezza varia sistematicamente lungo costa e tale per cui nel giro di poche decine di metri si susseguono ampie porzioni di spiaggia con antistanti



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



fondali poco profondi, a porzioni di spiaggia molto stretta e con fondali ripidi e profondi. Dal punto di vista geomorfologico tale caratteristica è il risultato dello sviluppo di “correnti a celle” che, alternandosi lungo costa, ne modellano in maniera più o meno regolare la forma. Tale fenomenologia si sviluppa principalmente in tratti litoranei in cui la direzione prevalente delle onde è circa perpendicolare a costa, appunto come nel caso del litorale meridionale del PNC orientato circa N-S e quindi perpendicolarmente ai mari occidentali.

Differentemente, in porzioni litoranee che si orientano obliquamente alle onde prevalenti, si sviluppa principalmente una corrente litoranea la cui direzione è coerente con quella delle onde incidenti. Tale situazione è caratteristica della porzione settentrionale del litorale, soggetta al medesimo clima meteo-marino di quella meridionale, ma orientata con un angolo maggiore rispetto le onde prevalenti da occidente e quindi soggetta all'insorgenza di una corrente di “drift litoraneo” diretta verso Sud.

In figura 10 è riportata una schematizzazione della relazione tra le tipologie di morfologie di spiaggia e i forzanti ondosi, il modello concettuale risale al 1984 (Wright & Short, 1984) che, sebbene sia stato migliorato e modificato in questi ultimi decenni, rimane universalmente riconosciuto come un modello morfologico della costa tra i più utilizzati, ovvero il modello *morfodinamico di Wright & Short*. Con riferimento al caso del PNC, la porzione settentrionale e meridionale sono classificabili prevalentemente come “dissipativa” e “intermedia”, rispettivamente. Si noti bene che la parola inglese “cusp” di figura 10 indica proprio le cuspidi o le “forme festonate” di cui al principio del paragrafo.

Lo schema concettuale di *Wright & Short* non rappresenta uno “status” o condizione fissa di una spiaggia, ma una condizione che si verifica con una determinata probabilità in funzione delle condizioni ambientali e meteo-marine locali. La pendenza, la granulometria e l'orientazione di una spiaggia rappresentano le condizioni ambientali più importanti e sono contraddistinte da una variabilità naturale che nel tempo è molto minore di quella dei forzanti meteo-climatici; ne risulta che un determinato tratto di spiaggia può sperimentare vari “stadi morfodinamici” in funzione soprattutto della variabilità del clima ondoso, ovvero dell'altezza e direzione delle onde. Il clima meteo-marino locale del litorale del PNC è statisticamente definito come “bi-modale”, ovvero contraddistinto da due ondate principali che lo modellano: quelle da Ovest e quelle da Sud⁸. In funzione della modalità con cui queste due tipologie di mareggiate si susseguono, cambieranno le modalità di riequilibrio morfodinamico dei due settori di litorali.

Ulteriormente a tale variabilità “climatica”, è possibile comunque individuare una ulteriore complicazione dello stadio morfodinamico “intermedio” del tratto meridionale, ovvero una tipica migrazione verso Sud delle “forme cuspidate” o “festoni” ad opera del drift litoraneo che si genera nella porzione Nord e che caratterizza di conseguenza l'intera falcata litorale.

8 Atlante delle Onde nei mari italiani, APAT 2006. <https://development.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/atlante-delle-onde-nei-mari-italiani>

Con l'analisi dei dati di video-monitoraggio è stato possibile caratterizzare il fenomeno delle “cuspidi”, determinando sulle immagini orto-rettificate (figura 11):

- il posizionamento lungo costa delle zone in avanzamento e arretramento, ovvero le “cuspidi” e le “baie”;
- il posizionamento lungo costa delle porzioni di spiaggia con ampiezza minima, “baie”, indicata con la stella rossa in figura 11;
- la deviazione negativa delle porzioni di spiaggia con la minima ampiezza, ovvero quanta spiaggia mancante in relazione all’ampiezza media del tratto indagato dal sistema di monitoraggio.

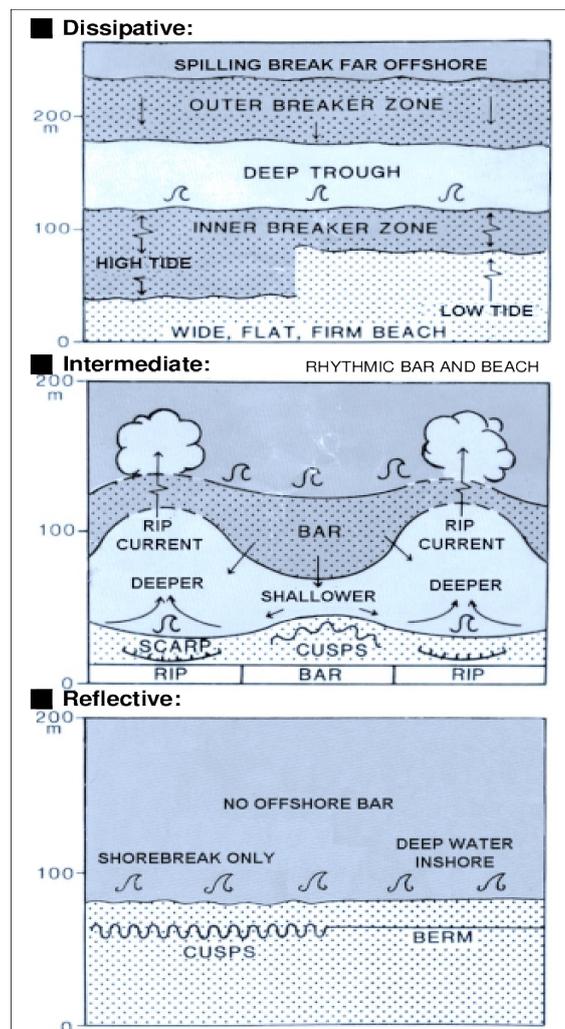


Figure 10. Schema concettuale del modello morfodinamico di Wright & Short.

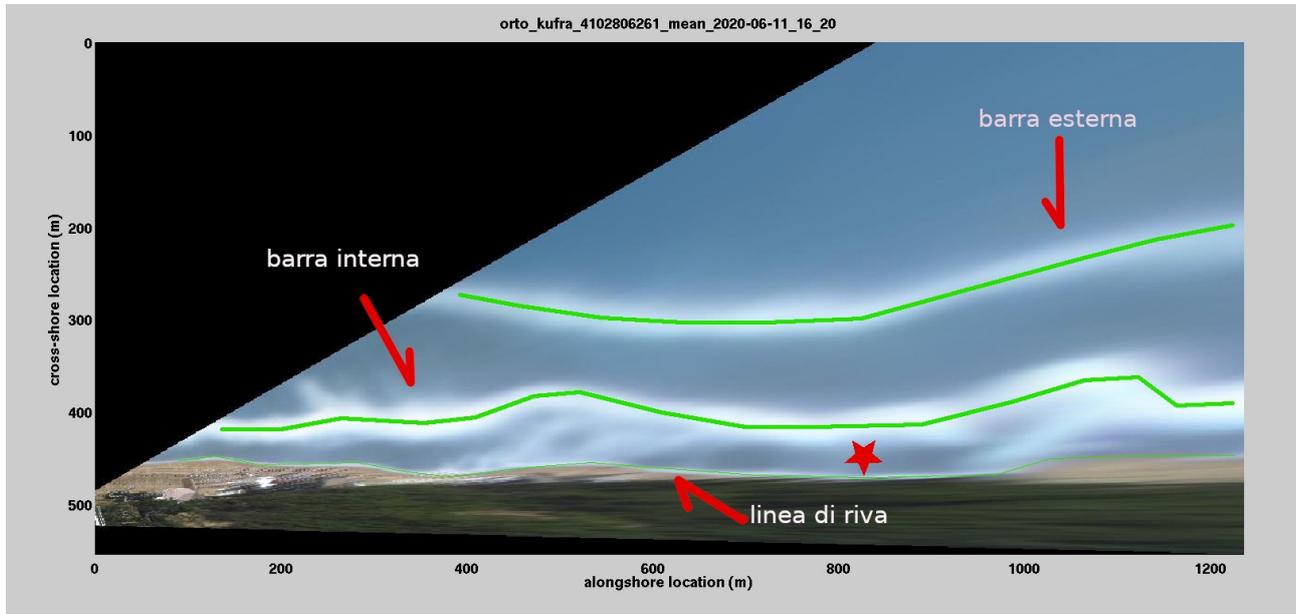


Figure 11. Esempio di immagine orto-rettificata su cui sono annotati i descrittori della morfologia estratti e il posizionamento, contraddistinto da una stella, della zona a maggior erosione (baia).

Successivamente, è stato possibile analizzare:

- la dinamica del sistema a festoni nel tempo (figura 12)
- le velocità di spostamento delle baie con condizioni di maggior erosione (figura 13);
- la morfologia dei fondali contestuale ai momenti di massima sinuosità, ovvero i momenti in cui le cuspidi e le baie erano molto accentuate (si discuterà nel prossimo paragrafo).

Nel periodo analizzato (2015-10 a 2021-10) sono stati riconosciuti sei eventi erosivi puntuali, definiti “hot spot erosivi” o “baie”, tre dei quali contraddistinti da entità erosiva maggiore di 15m nel marzo del 2018, febbraio 2019 e febbraio 2021. La localizzazione di questi tre eventi è stata a circa 800m, 400m e 600m dalla stazione di Kufra. In particolare il primo evento erosivo rappresenta il culmine di una migrazione di un punto erosivo che si sposta verso sud di circa 200m rispetto alla posizione dell’inizio del 2017. In generale la persistenza degli hot spot erosivi registrati varia da un minimo di 2 mesi ad un massimo di circa un anno, con la massima persistenza registrata nel 2021 e la massima erosione registrata nel 2018.

L’andamento di lungo periodo delle festonature risulta fortemente relazionato allo stato morfologico dei fondali e verrà pertanto riportato a conclusione del paragrafo.

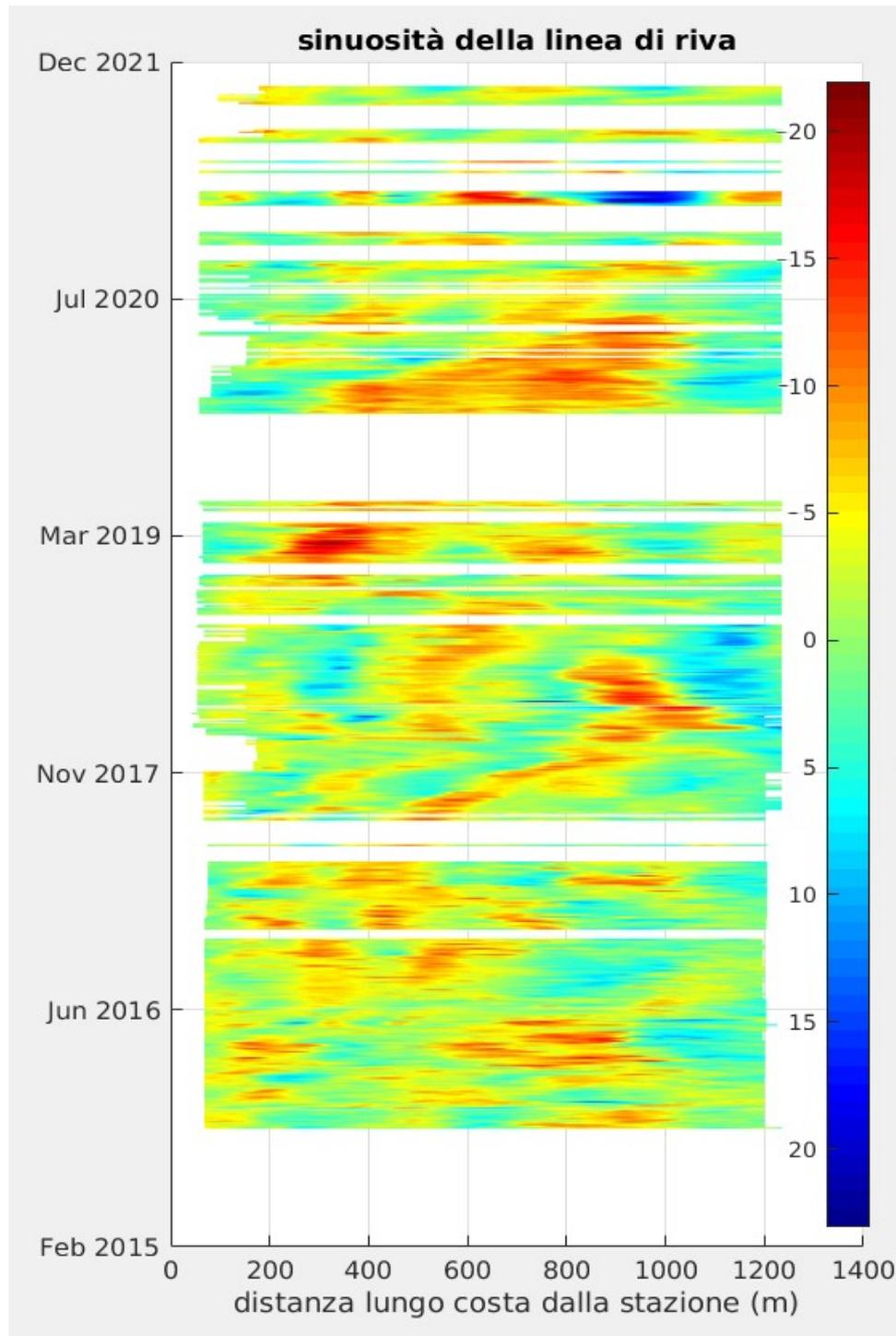


Figure 12. Andamento della sinuosità della linea di riva, ovvero ampiezza delle cuspidi (colore blu) e delle baie (colore rosso) lungo il tratto analizzato [dalla stazione Kufra sino a 1200m verso sud].

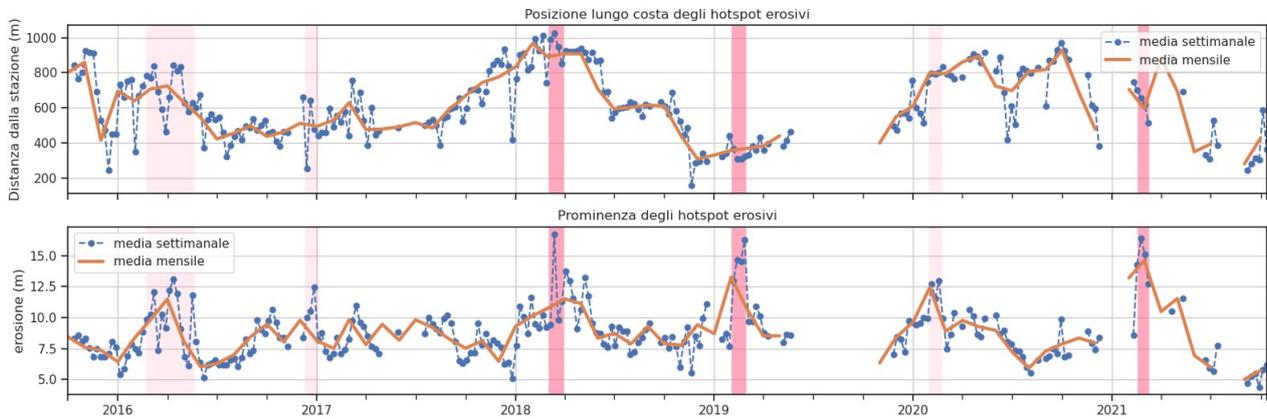


Figure 13. Andamento dei fenomeni erosivi dovuti alle cuspidi. Nel pannello superiore la localizzazione lungo costa dei fenomeni erosivi, nel pannello inferiore l'entità dell'erosione. In rosso chiaro gli eventi con erosione della spiaggia maggiore di 15m, in rosa gli eventi con erosione minore di 15m.

Lo stato morfologico dei fondali

La caratteristica più importante riscontrata dall'analisi dei dati di video-monitoraggio è la natura ciclica con cui si modificano i fondali analizzati, similmente alle risultanze degli altri siti COPEMAP (Parlagreco et alii 2019), ovvero la tendenza riconosciuta su molte spiagge del mondo e nota come NOM-Net Offshore Migration (migrazione netta verso mare). Tale fenomeno è contraddistinto da un progressivo allontanamento delle barre sabbiose secondo un ciclo caratteristico formato da:

- a) genesi di una barra a riva;
- b) migrazione continua verso mare;
- c) scomparsa della barra;
- d) genesi di una nuova barra a riva e proseguimento dei punti precedenti.

Tali cicli NOM sono contraddistinti da ampiezze e velocità caratteristici, ovvero siti con caratteristiche ambientali differenti sono contraddistinti da cicli con ampiezze e velocità differenti.

Lo stato attuale di osservazioni a Sabaudia, riportato in **figura 14**, non ha fornito ancora l'osservazione della chiusura di un ciclo (differentemente da altre stazioni COPEMAP), non è stato ancora possibile individuare velocità e tempistiche specifiche del sito PNC. Si possono formulare però alcune considerazioni, anche per similitudine delle risultanze degli altri siti COPEMAP e di altri siti documentati in bibliografia internazionale, ovvero:

- la linea di riva media, al netto delle fenomenologie erosive puntuali precedentemente descritte, rimane stabile per tutto il periodo;



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



- la prima barra che nel 2015 era posizionata a circa 50m da riva, nel 2021 non è più presente e l'ultima localizzazione risale a gennaio 2020 a circa 300m da riva;
- la seconda barra che nel 2015 era posizionata a circa 120m da riva, nel 2021 si localizza a circa 350m da riva;
- la massima distanza a cui è stata osservata la barra più esterna si attesta a circa 350m da riva, per cui è verosimile immaginare che tale distanza rappresenti il limite massimo della zona dei frangenti a Sabaudia;
- la massima distanza raggiunta dalla barra più esterna è rimasta stabile per 2 anni (2018-2020);
- nel 2021, contestualmente alla suddetta scomparsa della barra più esterna, si registra una veloce migrazione verso mare di quella più interna che a novembre 2021 si attesta circa alla stessa distanza della precedente barra (2018-2020)
- è verosimile ipotizzare che la distanza della barra più esterna (prima barra della figura) sia ormai in una fase di “decelerazione”, ovvero tale barra non si posizionerà a distanze maggiori;
- per quanto detto al punto precedente è altresì verosimile aspettarsi la “chiusura del primo ciclo di migrazione” a cui seguirà il ripristino delle condizioni 2016-2017;
- le velocità di spostamento maggiori si riscontrano all'occorrenza di periodi ondosi contraddistinti da valori energetici (flusso energetico) superiori alla soglia del 75° percentile calcolato sul record ondosso 2006-2020;
- non tutti i periodi ondosi contraddistinti da valori energetici (flusso energetico) superiori alla soglia del 75° percentile inducono sensibili variazioni morfologiche.

Per confronto con un fondale la cui velocità di migrazione e la genesi morfologica delle barre è differente si riporta in **figura 15** l'andamento ricostruito nella spiaggia di Terracina, contraddistinto da:

- tre eventi di genesi di barra a riva (2009, 2015, 2018);
- entità di migrazione massime di 200m;
- arretramento netto della linea di riva di circa 50m in 14 anni (decadimento dell'intervento di ripascimento del 2007) che si esplica però non in maniera continua ma episodicamente con tre “scatti erosivi” contestuali alla genesi delle nuove barre;
- le velocità di spostamento maggiori si riscontrano all'occorrenza di periodi ondosi contraddistinti da valori energetici (flusso energetico) superiori alla soglia del 75° percentile calcolato sul record ondosso 2006-2020;

- non tutti i periodi ondosi contraddistinti da valori energetici (flusso energetico) superiori alla soglia del 75° percentile inducono sensibili variazioni morfologiche.

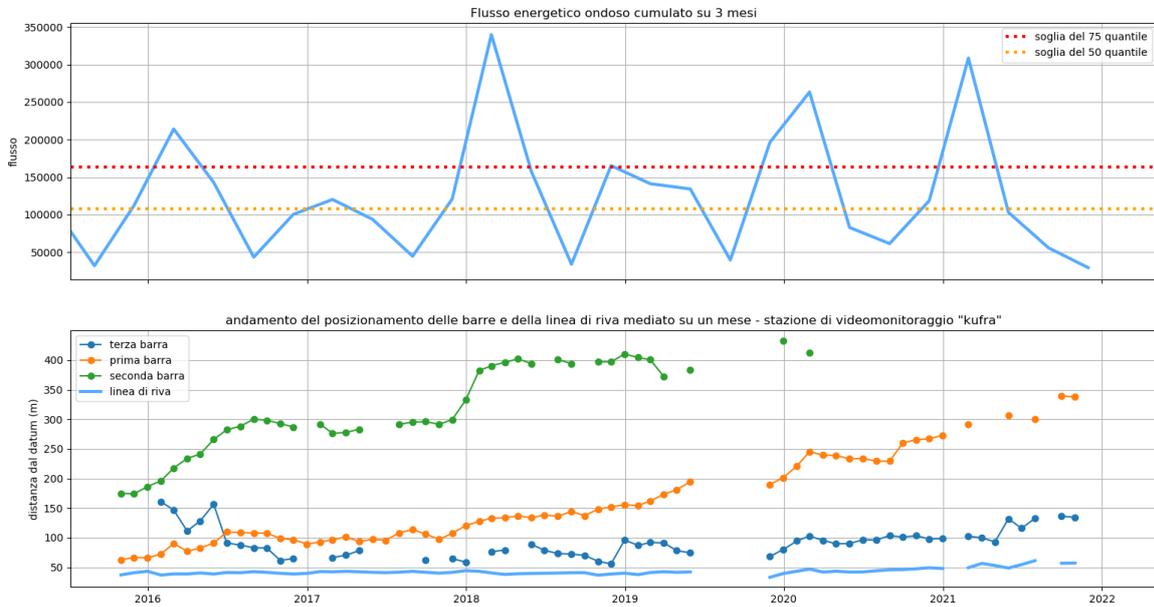


Figure 14. Pannello superiore: flusso energetico ondoso cumulato trimestralmente; Pannello inferiore: evoluzione del sistema spiaggia di Sabaudia desunto da dati di video-monitoraggio.

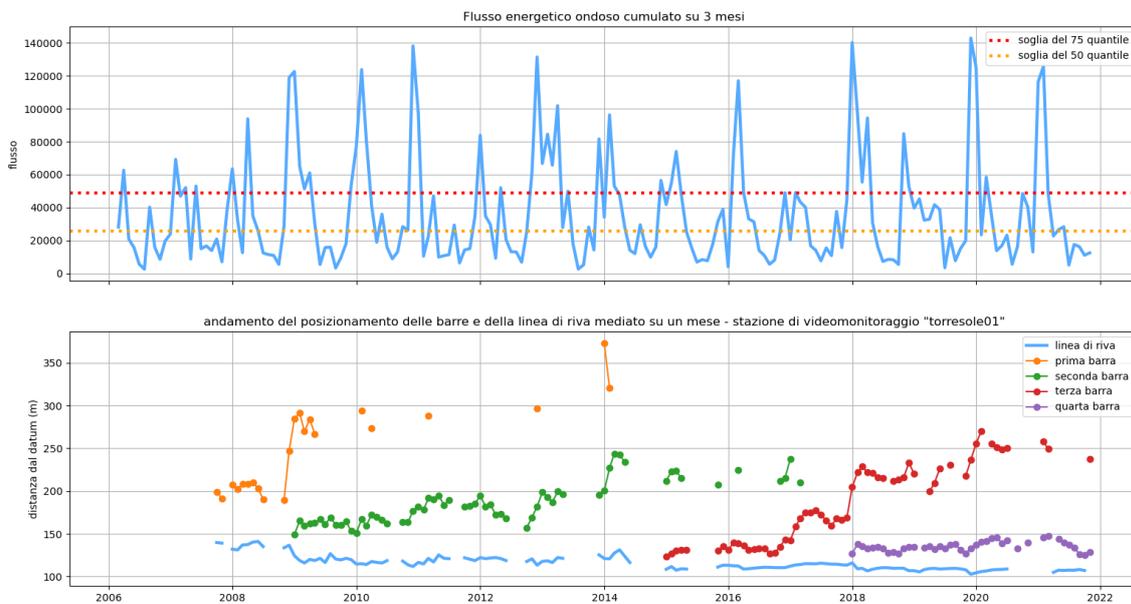


Figure 15. Pannello superiore: flusso energetico ondoso cumulato trimestralmente; Pannello inferiore: evoluzione del sistema spiaggia di Terracina desunto da dati di video-monitoraggio.

In **figura 16** si confronta l'andamento temporale della morfologia dei fondali con l'insorgenza di fenomenologie erosive puntuali a costa (così detti hot spot erosivi), come descritto precedentemente e riportato in figura 13.

Gli *hot spot erosivi* analizzati dal sistema di video-monitoraggio caratterizzano il solo tratto compreso all'incirca tra l'albergo "Hoasi di Kufra" e l'Hotel "Le dune", nello specifico la porzione posta 1.2km a sud dell'Hotel "Oasi di Kufra".

Il raffronto con l'evoluzione dei fondali indica evidentemente che l'insorgenza degli hot spot erosivi su questo tratto di litorale è fortemente connessa alla conformazione e posizionamento della prima barra che, nel periodo analizzato, si è spostata progressivamente verso largo di circa 250m. Tale fenomeno, inquadrabile nelle dinamiche descritte precedentemente (NOM), ha inoltre innescato lo sviluppo di nuova barra intermedia che progressivamente ha interagito con il campo idrodinamico sottocosta.

Tale interazione ha quindi sostenuto lo sviluppo di forme erosive puntuali (*hot spot erosivi*) e influenzato la permanenza temporale su specifici tratti di litorale in quanto la mobilità della barra interna è un processo caratterizzato da una certa inerzia indotta da:

- la volumetria della barra che deve spostarsi;
- il controllo che opera la barra esterna sulla mobilità di quella interna.

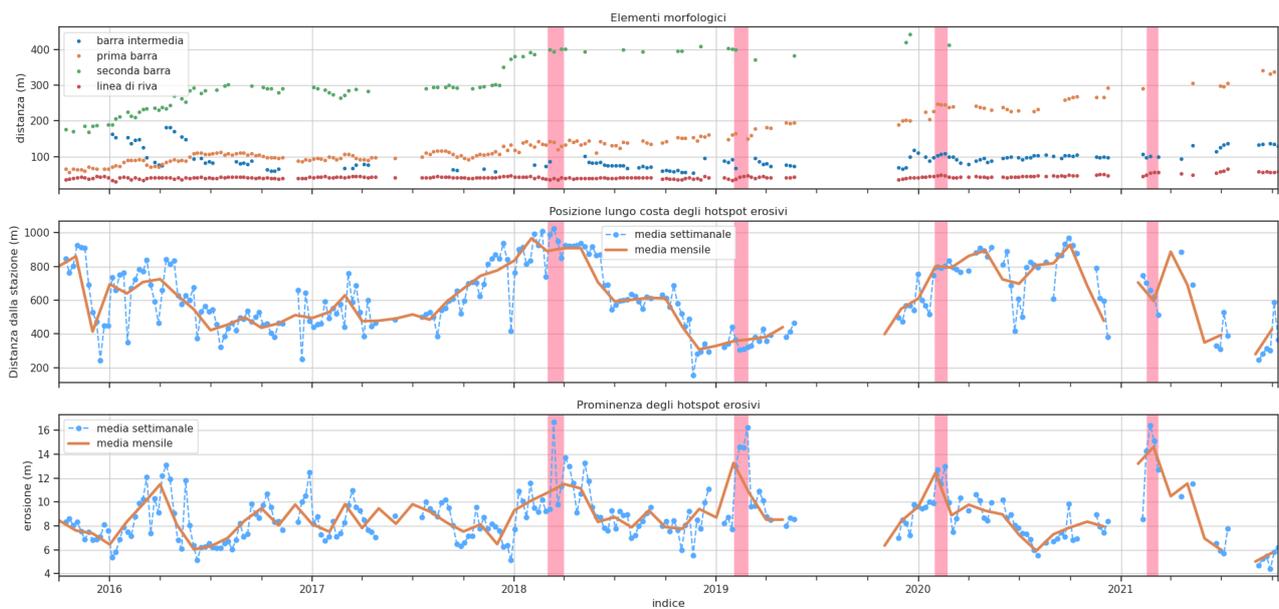


Figure 16. Andamento temporale della morfologia dei fondali (pannello superiore), della posizione lungo costa degli hot spot erosivi (pannello intermedio) e della prominente degli hot spot erosivi (pannello inferiore). Le fasce rosse indicano il massimo sviluppo degli hot spot erosivi.

4.1.2 L'andamento di lungo termine della spiaggia del PNC

Come descritto nel paragrafo 4, per meglio contestualizzare il comportamento della spiaggia del PNC nel lungo termine e in un contesto di area vasta, così come per le successive aree di studio, è stato analizzato l'andamento della linea di riva estratta da immagini satellitari secondo lo schema riportato in **figura 6 e tabella 2**.

Per facilitare l'interpretazione dei dati di evoluzione della linea di riva si è proceduti ad accoppiare gli stessi su sub-unità caratteristiche del tratto litoraneo in analisi, per il litorale del PNC ne sono state individuate tre. Due derivanti dalla predetta analisi cluster (cfr. paragrafo 4.1), il settore Nord e Sud, una ulteriore indicante la porzione di litorale della Marina di Latina, denominata area limitrofa Nord (**figura 17**).



Figure 17. Aree utilizzate per analizzare il comportamento aggregato della linea di riva estratta dai dati satellitari.

L'andamento della linea di riva è stato ulteriormente analizzato scomponendo il segnale di lungo periodo (trend), quello stagionale e quello residuo (**figura 18**).

Il dato di lungo periodo ci fornisce un'indicazione del comportamento così detto di “fondo” dei tratti litoranei analizzati, ovvero ci indica se nei suddetti tratti sono presenti trend di erosione o di accrescimento. Per ogni componente è stato calcolato, e con riferimento a **figura 18**:

- il valore medio della sub-unità, riportato con la linea blu;
- l'involuppo delle risultanze ottenute per singolo transetto di misura, riportato con l'area ombreggiata viola.

Tale aggregazione ha permesso di valutare lo scostamento tra il valore medio e quello ottenuto dai singoli transetti di misura e quindi stimare quanto omogeneamente si comportasse la sub-unità indagata. In definitiva è stato analizzato l'andamento temporale e spaziale del comportamento della linea di riva per singola sub-unità.

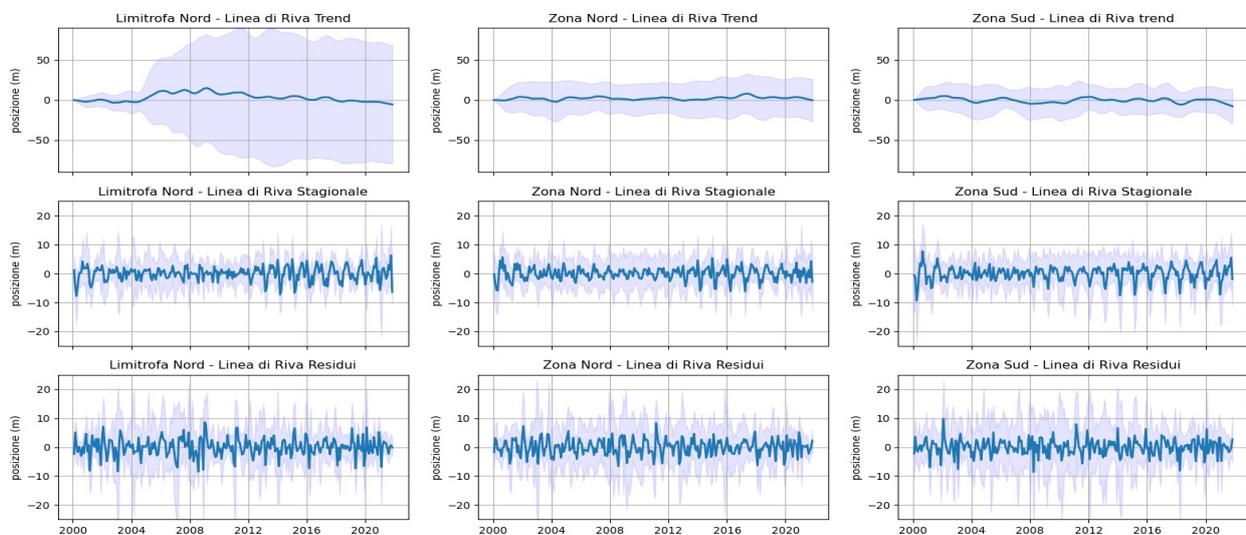


Figure 18. Andamento della linea di riva e rispettivi componenti per le tre sub-unità del PNC.

Il **trend della linea di riva** (pannelli superiori della **figura 18**) mostra un andamento più o meno stabile, marcato temporalmente da minime oscillazioni intorno al valore zero. Le oscillazioni con ampiezza maggiori si riscontrano nel periodo 2005-2012 nella sola area limitrofa nord, indicanti gli effetti locali di avanzamento della spiaggia a seguito degli interventi di difesa presso Foce Verde nel 2003-2004. Se ci si riferisce all'**involuppo del trend** (aree ombreggiate in violetto di **figura 18**), il comportamento è molto differenziato nelle tre sub-unità e suggerisce interessanti considerazioni:

- la porzione della Marina di Latina (limitrofa Nord) si comporta in modo tutt'altro che omogeneo, essendo caratterizzata dai massimi range di variazione dell'involuppo,



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



nell'ordine di +/- 50m, ovvero alcune porzioni del litorale avanzano molto a scapito dei settori limitrofi; tale differenziazione si stabilizza a partire dal 2012;

- b) le aree Nord e Sud del PNC, essendo tratti litoranei naturali privi di difese rigide, mostrano un involuppo simile e molto assottigliato (valori massimi di +/- 20m) rispetto il valore mediano; ciò evidenzia che la linea di riva è andata evolvendo in maniera omogenea su entrambe le sub-unità, ovvero che tutti i fenomeni perturbativi (in questo caso imputabili alle sole mareggiate) sono stati “riassorbiti” a seguito di spostamento lungo costa del materiale disponibile.

L'andamento della **componente stagionale** (pannelli intermedi) non fornisce particolari differenze tra i settori se non un andamento “stagionale” più marcato nel settore Sud, probabilmente in relazione alla natura dello stesso, presumibilmente legato all'orientazione rispetto le onde prevalenti, come evidenziato dai dati di video-monitoraggio in precedenza.

L'andamento dei **residui** (pannelli inferiori) non fornisce particolari evidenze differenziali delle tre sub-unità.

Di seguito viene descritta nel dettaglio l'evoluzione della linea di riva nell'area Limitrofa (Marina di Latina) per meglio comprendere le influenze degli interventi di difesa eseguiti nel 2004-2005 sul tratto contiguo alla zona di intervento.

Con riferimento alla **figura 19**, nel pannello superiore sono indicati i transetti di misura della linea di riva con rispettivi codici identificativi e nel pannello inferiore l'andamento della linea di riva estratta su ogni transetto. Le linee verticali indicano:

- il momento in cui è stato eseguito l'intervento di difesa con ripascimento protetto da pennelli e barriera soffolta (in verde);
- i momenti in cui su ogni transetto si registra la fase erosiva (in rosso)
- nel pannello superiore si riporta la localizzazione dei transetti che vanno in erosione e in accrescimento.

Il dato osservativo evidenzia come il fenomeno erosivo si vada spostando sottoflutto e nel tempo.

Le tendenze erosive, registrando la progressiva sottoalimentazione della spiaggia (localizzata presso il transetto di misura), tendono a migrare nel senso del drift litoraneo netto, ovvero nel tempo la spiaggia posizionata più a sud riceverà sempre meno sabbia perché trattenuta dalle difese rigide posizionate più a monte, ovvero a Nord (nel senso della corrente di litoranea netta).

Con lo specifico del caso riportato, nel transetto posto a circa 1500m dalla zona d'intervento del 2003-2004 si stabilizza il fenomeno erosivo a 10 anni dall'intervento, ovvero dal 2013 la spiaggia è definitivamente sotto-alimentata.

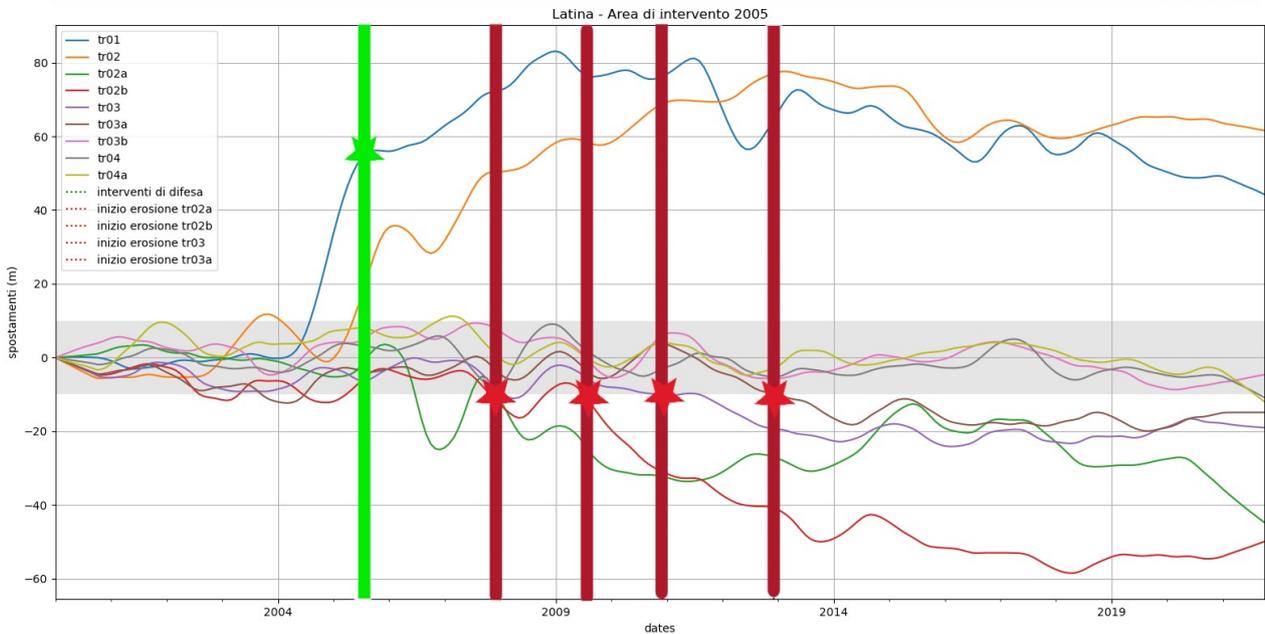


Figure 19. Descrizione dell'evoluzione temporale del fenomeno erosivo/deposizionale nell'intorno della zona soggetta a intervento di difesa 2003-2004 costituito da ripascimento e costruzione di pennelli trasversali e barriere soffolte. La banda grigia rappresenta la soglia di risoluzione massima del dato, ovvero 10m.

4.1.3 Considerazioni conclusive

In un quadro di sintesi si ritiene di poter ritenere verosimilmente corroborati dalle osservazioni i seguenti concetti:

1. la mobilità e lo scambio di sedimento tra le barre e la linea di riva sono fenomeni che caratterizzano in maniera importante l'evoluzione della porzione di litorale di Sabaudia come osservato dalle centraline di video-monitoraggio;



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



2. la spiaggia di Sabaudia è soggetta a “cicli autonomi” di variazione dell’assetto dei fondali e di quanto questi riescano a dissipare l’energia ondosa incidente;

Declinando i concetti tecnico/scientifici in termini utili in ambito di gestione della costa è possibile schematizzare il fenomeno erosivo in maniera differenziata tra le sub-unità che costituiscono il litorale del PNC:

- i. la porzione limitrofa al PNC, Marina di Latina, non protetta e stabilizzata dalle difese rigide è soggetta ai maggiori fenomeni erosivi, ormai cronici, la cui origine è connessa alla costruzione delle difese stesse;
- ii. le porzioni settentrionale e meridionale del litorale del PNC, rispettivamente Capo Portiere – Caterattino e Caterattino – Torre Paola, sono interessate da fenomeni erosivi la cui estensione lungo costa e permanenza temporale è ben differente:
 - a) nella porzione Nord le fenomenologie erosive sono spesso legate a importanti eventi di mareggiata e tendono ad essere “riassorbite” in periodi più o meno corti mai superiori ai 2/3 mesi;
 - b) la porzione Sud è maggiormente interessata da fenomeni erosivi localizzati, ovvero che si concentrano in porzioni ristrette di litorale, ovvero hot spot erosivi innescati da variazioni sostanziali dei fondali legate a eventi di mareggiata importanti, la persistenza temporale è dell’ordine di 6/8 mesi
- iii. la capacità di “riassorbimento” delle fenomenologie erosive è maggiore nei tratti litoranei in cui il trasporto di sabbia netto diretto verso Sud non viene modificato da strutture aggettanti a mare;
- iv. durante gli eventi meteo-marini “normali”, ovvero le normali mareggiate, lo scambio sedimentario tra duna, spiaggia e fondali è spesso attivo nella sola porzione Nord del PNC, la stessa connessione sedimentaria è attiva nella porzione Sud esclusivamente durante eventi meteo-marini “severi”;
- v. durante gli eventi meteo-marini “severi” i tratti litoranei Nord e Sud del PNC sono in connessione sedimentaria nella porzione esterna dei fondali, ovvero il maggior quantitativo di sedimento si mobilita presso la zona dei frangenti più esterni e segue il senso del trasporto sedimentario indotto, principalmente verso Sud;
- vi. lo stato vegetazionale del fronte e del piede dunale influenza sensibilmente le dinamiche sedimentarie della porzione superiore della spiaggia, tra la linea di riva e la prima barra, amplificando sensibilmente le criticità erosive connesse ad eventi ondosi che sommergono buona parte della spiaggia.



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



4.2 Il litorale del PNG

Il litorale del PNG si sviluppa principalmente lungo il Promontorio del Gargano, caratterizzato da una costa prevalentemente rocciosa nel versante meridionale e da una falcata sabbiosa che si estende per circa 60 km nel versante settentrionale, localmente interrotta da speroni rocciosi.

Tale porzione litoranea, che si estende da Marina di Lesina a Peschici, può quindi essere suddivisa in almeno tre unità in funzione della continuità laterale delle falcate sabbiose:

- una porzione che si estende da Marina di Lesina alle propaggini montuose presso Capojale e Torre Mileto, della lunghezza di circa 25km (sub-unità 1)
- una porzione che si estende da Torre Mileto a Rodi Garganico della lunghezza di circa 17 km (sub-unità 2), ulteriormente “suddivisibile” in tre sub-unità per la presenza della struttura aggettanti di Foce Varano e dal saliente di Punta Cucchiara;
- una porzione che si estende dal porto turistico di Rodi a monte Pucci, della lunghezza di circa 8 km (sub-unità 3).

Il sedimento dei suddetti tratti litoranei viene mobilitato principalmente dalle mareggiate provenienti dai quadranti settentrionali, sostenute dai venti di “bora”. Il verso del trasporto netto di sedimenti che ne risulta è diretto verso Est.

Con riferimento alla porzione terminale della falcata litoranea del litorale Nord del Gargano, nei pressi del sito di monitoraggio (descritto nel prossimo paragrafo), risulta importante evidenziare l'importante fenomeno erosivo innescato dall'ampliamento del porto turistico di Rodi Garganico. L'allungamento dei moli foranei, interagendo sensibilmente con il drift litoraneo verso Est, ha indotto una forte deposizione di sedimenti a ponente del porto con il conseguente ampliamento della spiaggia i cui massimi di ampiezza sono maggiori di 100m. Contestualmente a tale aspetto “positivo” si è progressivamente depauperato il flusso di sedimenti che naturalmente andava a ripascere le spiagge sotto flutto, in particolare quelle del comune di San Menaio (figura 20).

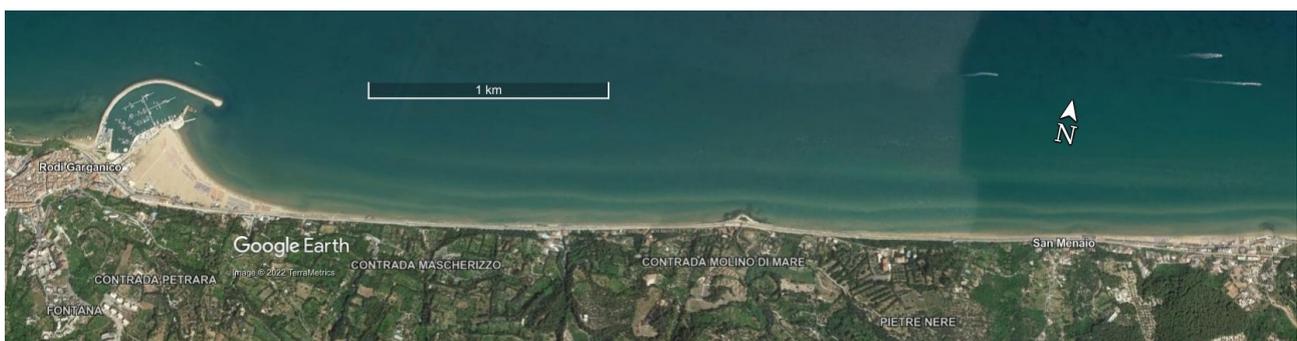


Figure 20. Assetto morfologico del litorale posto sottoflutto del porto turistico di Rodi Garganico.

4.2.1 Siti di video-monitoraggio costiero nel PNG

Nell'inverno del 2018 è stata installata una stazione di video-monitoraggio nella porzione settentrionale del litorale afferente al PNG presso il comune di Rodi Garganico. La struttura ospitante, l'Istituto di Istruzione Secondaria "Mauro del Giudice", è localizzata a circa 200m da riva e ad una quota di circa 50m sul livello marino.

La caratteristica del litorale osservato è tipica del tratto nord del promontorio, ovvero una spiaggia sabbiosa a debole pendenza contraddistinta almeno da 3 ordini di barre sommerse. La spiaggia di Rodi Garganico si sviluppa ai piedi del promontorio calcareo ed è contraddistinta da un'ampiezza media di 40m e da un retrospiaggia su cui si sviluppa un apparato dunale di modeste dimensioni e comunque limitato dalla presenza della vecchia linea ferroviaria. La granulometria della spiaggia ricade al limite tra sabbie medie e sabbie fini. L'andamento del litorale è rettilineo, orientato circa Est-Ovest e limitato dallo sperone calcareo di Rodi Garganico e dal saliente di Punta Cucchiara, rispettivamente ad Est ed Ovest.

In figura 21 si riporta la restituzione della visione orto-rettificata del tratto litorale inquadrato dal sistema di monitoraggio, circa un km di spiaggia. L'immagine della figura riprende l'assetto dei fondali all'occorrenza di una mareggiata del novembre 2018. E' ben evidente la presenza di tre barre e il posizionamento del limite di sommersione della spiaggia (linea tratteggiata celeste). Come le altre stazioni di video-monitoraggio, l'origine del sistema di riferimento è posizionato in prossimità della stazione con l'asse delle ordinate orientato perpendicolarmente all'orientazione media della spiaggia, coincidente con l'asse delle ascisse.

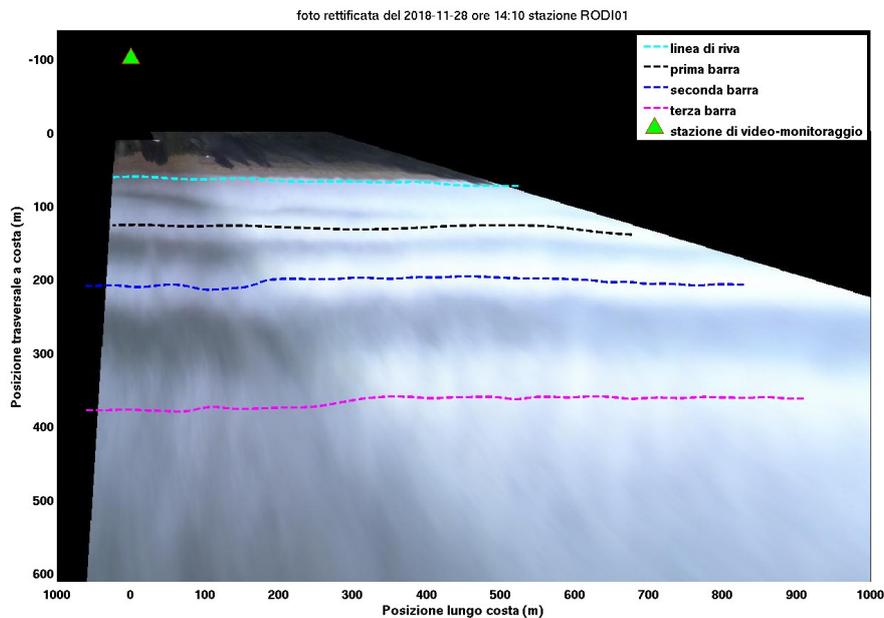


Figure 21. Visione orto-rettificata della spiaggia di Rodi Garganico.

Il sistema spiaggia/fondali osservato dalla stazione Rodi01

Nell'interpretazione fenomenologica della spiaggia di Rodi, visto l'intervallo di osservazione minore rispetto le altre stazioni, ci si è avvalsi delle risultanze delle altre spiagge per confutare o meno l'insorgenza delle tipiche fenomenologie di lungo termine riscontrabili più rigorosamente dall'analisi condotta su serie temporali di osservazioni più lunghe.

La spiaggia di Rodi, similmente a quella di Sabaudia, è contraddistinta da comportamenti riconducibili ai cicli NOM e già descritti nel **paragrafo 4.1.1**.

Nel periodo di analisi, novembre 2018-novembre 2021, la spiaggia di Rodi Garganico è stata caratterizzata da un contenuto energetico ondoso, cumulato trimestralmente, che è andato progressivamente diminuendo (**figura 22**).

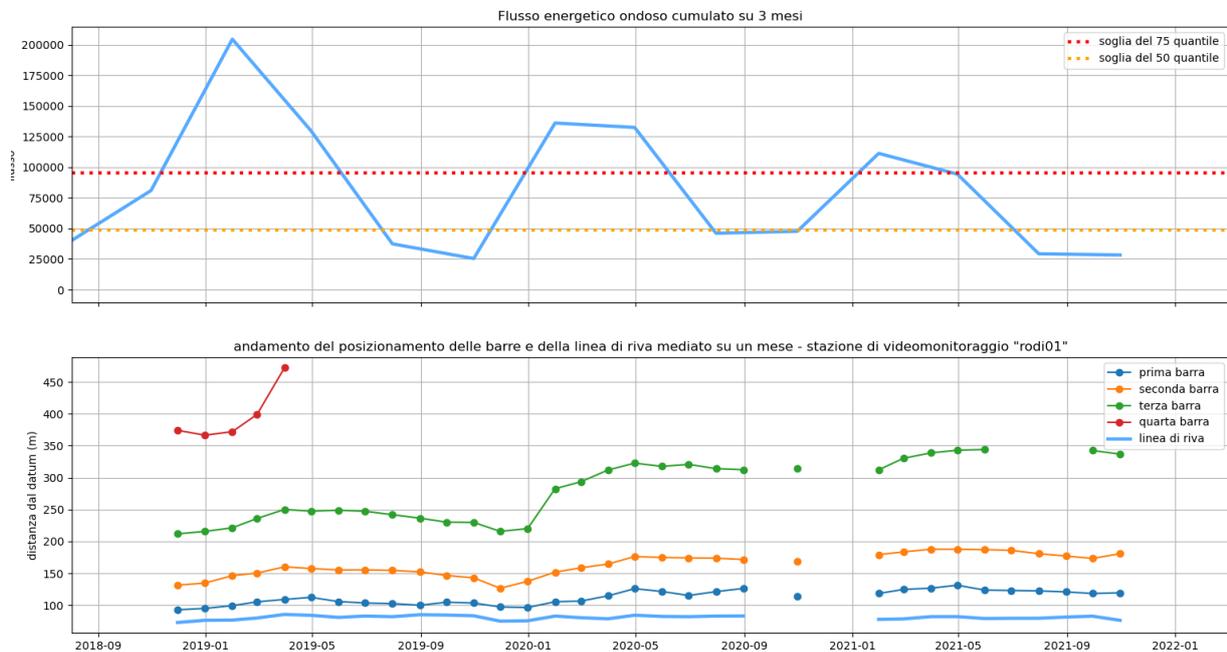


Figure 22. Pannello superiore: flusso energetico ondoso cumulato trimestralmente; Pannello inferiore: evoluzione del sistema spiaggia di Rodi Garganico desunto da dati di videomonitoraggio.

La spiaggia è andata adattandosi a tale “trend” di ondità sviluppando una transizione da una conformazione di “alta energia” ad una di “bassa energia”, ovvero a partire dalle mareggiate del primo quadrimestre del 2019 la morfologia dei fondali è contraddistinta da un sistema di quattro barre che ha permesso una dissipazione adeguata del contenuto energetico delle onde incidenti. Tale “fase di alta energia” si esaurisce con la definitiva scomparsa della barra più esterna (linea rossa nella **figura 22**) e lo sviluppo di un setting morfologico costituito da tre barre che perdura fino alla successiva stagione invernale del 2020. La risposta della spiaggia alle onde meno energetiche (in



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



senso cumulato) di questo secondo periodo si caratterizza da un ulteriore accomodamento tale da rendere più efficace la capacità di protezione costiera, quindi la barra esterna si distanzia ulteriormente da riva per posizionarsi a profondità maggiori, e quindi attivare la sua capacità di protezione con onde più alte (che frangono a maggiore profondità e distanza dalla linea di riva). Questo stadio morfologico perdura per tutto il 2021 in quanto la stagione invernale (2021) non ha impattato la costa con energie ondose (cumulate) tali da indurre un'ulteriore adattamento della spiaggia.

Come riscontrato nelle altre spiagge analizzate e in altri contesti geografici (Wijnberg & Terwindt, 1995; Shand et al., 1999; Ruesink et al., 2009) non sono stati riscontrati importanti fenomeni di arretramento della linea di riva a testimonianza che la spiaggia e i fondali analizzati sono comunque riforniti attivamente dalla corrente litoranea diretta verso ponente, la stessa corrente che produce l'insabbiamento del porto turistico e che non riesce a rifornire altrettanto attivamente la spiaggia e i fondali di San Menaio.

In sintesi, è verosimile aspettarsi ulteriori aggiustamenti della spiaggia in risposta alle prossime mareggiate con contenuto energetico paragonabile a quelle della prima metà del 2019, ma non tali da indurre fenomenologie erosive di particolare rilevanza. Se anche tale spiaggia sarà soggetta a ciclicità nel posizionamento delle barre (NOM), sarà probabile osservare:

- un nuovo allontanamento e scomparsa della barra più esterna che, comunque si posizionerà a distanze e profondità comparabili al periodo 2019-2020;
- la genesi di una nuova barra sotto riva che inizierà il suo ciclo di allontanamento verso il largo.

Dal punto di vista delle fenomenologie erosive, sebbene non particolarmente importanti, è utile un confronto con il sito del PNC per inquadrare le differenze più sostanziali e ricercarne le motivazioni. La spiaggia di Rodi, come i contigui litorali, ha un andamento lineare con una orientazione circa parallela alle mareggiate dai quadranti settentrionali. Si trova quindi in una condizione simile a quella del tratto meridionale del PNC, contraddistinto da fenomenologie erosive puntuali che hanno prodotto criticità in alcune porzioni di litorale. Differentemente da Sabaudia, la spiaggia di Rodi essendo meno pendente, risulta meno soggetta all'insorgenza di tali fenomenologie erosive, sebbene le morfologie della spiaggia spesso mostrano andamenti ritmici ma con poca prominenza topografica e quindi idrodinamica.

4.2.2 L'andamento di lungo termine della spiaggia del PNG

L'accesso alle immagini satellitari disponibili a partire dal 2013 ha permesso di analizzare il comportamento del litorale nord del Gargano e quindi contestualizzare le risultanze risultanti dall'analisi puntuale della spiaggia di Rodi al contesto di area vasta del litorale nord del Gargano, ricadente per buona parte nell'area naturale protetta del PNG. Tale analisi si è però limitata alla

porzione che va da Varano a Peschici, non contemplando le dinamiche evolutive del tratto antistante il lago di Lesina.

Per semplificare l'interpretazione dei dati estratti secondo quanto descritto all'inizio del paragrafo 4, si è proceduti ad accorpare le risultanze per sub-unità fisiografiche come precedentemente riportato all'inizio del paragrafo 4.2 e graficato in **figura 23**.



Figure 23. Areali utilizzati per analizzare il comportamento aggregato della linea di riva estratta dai dati satellitari.

L'andamento della linea di riva è stato ulteriormente analizzato scomponendo il segnale di lungo periodo (trend), quello stagionale e quello residuo (**figura 24**).

Il dato di lungo periodo ci fornisce un'indicazione del comportamento così detto di "fondo" dei tratti litoranei analizzati, ovvero ci indica se nei suddetti tratti sono presenti trend di erosione o di accrescimento. Per ogni componente è stato calcolato, e con riferimento a **figura 24**:

- il valore medio della sub-unità, riportato con la linea blu;
- l'inviluppo delle risultanze ottenute per singolo transetto di misura, riportato con l'area ombreggiata viola.

Tale aggregazione ha permesso di valutare lo scostamento tra il valore medio e quello ottenuto dai singoli transetti di misura e quindi indagare quanto omogeneamente si comportasse la sub-unità indagata. In definitiva è stato analizzato l'andamento temporale e spaziale del comportamento della linea di riva per singola sub-unità.

Il dato più importante, a livello di trend della linea di riva (pannelli superiori della **figura 24**), è che nelle tre sub-unità la linea di riva mediata mostra un andamento stabile. Se ci si riferisce all'inviluppo (aree ombreggiate in violetto di **figura 24**), il comportamento è molto differenziato e suggerisce interessanti considerazioni sull'evoluzione recente dei tre tratti litoranei:

- c) la porzione di Varano, il tratto litoraneo più naturale ed indisturbato, presenta un involuppo molto assottigliato ad evidenziare che il trend evolutivo della linea di riva è omogeneo su tutta la sub-unità, con la sola porzione prossima a foce Varano che evidenzia una debole fenomenologia erosiva dal 2013 al 2016, successivamente “riassorbita” dal litorale;
- d) la porzione centrale di Lido del Sole, interessata da un grado di antropizzazione maggiore rispetto al tratto Varano, sebbene caratterizzata anch’essa da un trend evolutivo complessivo pressoché stabile, mostra l’insorgenza di comportamenti differenziati nei vari settori. A partire dal 2016 si registrano fenomenologie di tipo erosivo e di accrescimento entro dei limiti massimi di $\pm 40\text{m}$, che poi tendono a stabilizzarsi;
- e) la porzione “rodi”, quella posizionata più a ponente, si comporta similmente alla porzione di Lido del Sole, ma contraddistinta dai maggiori valori dell’involuppo ($\pm 60\text{m}$), ad indicare che anche in questo tratto le variazioni di lungo periodo sono state importanti sia in fase di avanzamento che arretramento e non mostrano una tendenza a stabilizzarsi.

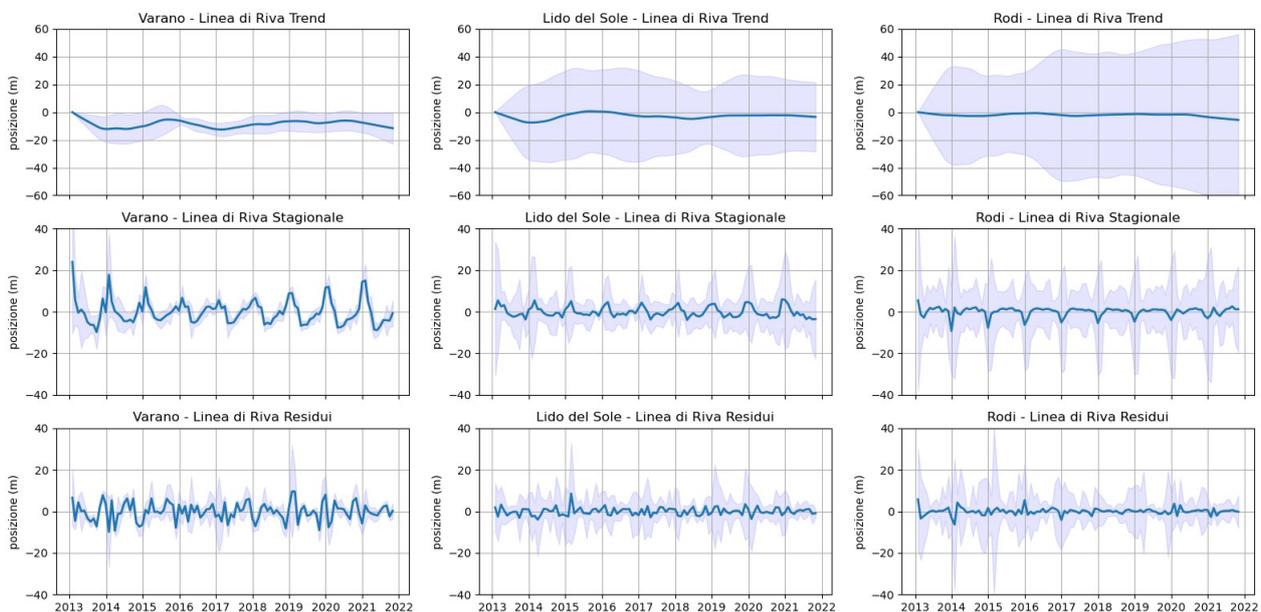


Figure 24. Andamento della linea di riva e rispettivi componenti per le tre sub-unità del PNG.

L’analisi della componente stagionale (pannelli intermedi) fornisce un’ulteriore indicazione sul grado di “libertà di evoluzione del litorale”, ovvero:

- a) il tratto più naturale di Varano mostra una ciclicità stagionale molto marcata e coerente su tutti i transesti di misura, indicando la capacità della spiaggia di avanzare e arretrare in



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



funzione della ciclicità meteo-marina ma di rimanere stabile, ovvero ad ogni mareggata che induce arretramento la spiaggia riesce poi a ristabilire la condizione media in maniera autonoma, naturalmente;

- b) nelle sub-unità “Lido del Sole” e “Rodi” l’andamento della tendenza stagionale mostra sia una diminuzione progressiva nelle ampiezze che nella coerenza tra i transetti, ad indicare probabilmente che gli eventi erosivi e deposizionali non riescono a compensarsi lungo l’intero tratto;
- c) l’andamento dei residui (pannelli inferiori), conferma ulteriormente le diverse capacità di recupero, e quindi resilienza, dei tre tratti analizzati con la porzione di Varano che mostra le maggiori capacità resilienti di tutto il tratto litoraneo di questa porzione del versante nord del promontorio del Gargano.

4.2.3 Considerazioni conclusive

In un quadro di sintesi si ritiene di poter ritenere verosimilmente corroborati dalle osservazioni i seguenti concetti:

- 1. la mobilità e lo scambio di sedimento tra le barre e la linea di riva sono fenomeni che caratterizzano in maniera importante l’evoluzione della porzione di litorale di Rodi Garganico come osservato dalle centraline di video-monitoraggio;
- 2. sebbene osservata per un intervallo temporale limitato, è presumibile che anche la spiaggia di Rodi Garganico sia soggetta a “cicli autonomi” di variazione dell’assetto dei fondali e di quanto questi riescano a dissipare l’energia ondata incidente;

Declinando i concetti tecnico/scientifici in termini utili in ambito di gestione della costa è possibile schematizzare le fenomenologie erosivo/deposizionali in maniera differenziata tra le sub-unità che costituiscono il litorale del PNG:

- i. il comportamento della porzione di litorale “Varano” è tipico di un sistema resiliente, sebbene sia posizionata immediatamente a ridosso dell’importante molo a protezione del canale della laguna, il litorale mostra una capacità di riequilibrio autonomo che è principalmente relazionata alla continuità laterale di spiaggia indisturbata;
- ii. le porzioni “Lido del Sole” e “Rodi”, essendo progressivamente più confinate del tratto “Varano”, sono contraddistinte da disomogeneità del comportamento della linea di riva probabilmente legate ad una limitata capacità di riequilibrio sedimentario lungo costa;
- iii. gli impatti dell’allargamento del porto turistico di Rodi Garganico testimoniano che il flusso di sedimenti agisce in continuità lungo tutto il versante nord del promontorio del Gargano.

4.3 Il litorale del AMP-TDC

Il litorale afferente all'AMP di TDC si localizza nell'Adriatico Centrale nel tratto litoraneo sabbioso compreso tra il fiume Vomano e il Saline per un'estensione di circa 17 km.

È possibile individuare alcuni elementi naturali e antropici che suddividono ulteriormente questo tratto litoraneo in tre sub unità:

1. il tratto tra foce Vomano e il torrente Calvano contraddistinto da una granulometria sabbiosa mista a ghiaia (per la prossimità della foce ghiaiosa del Vomano appunto) e dalla presenza di strutture rigide di difesa (pennelli) per una lunghezza di circa 5km;
2. il tratto tra il Calvano e il saliente presso cui sorge la Torre del Cerrano, contraddistinto da una modesta duna e dalla assenza totale di strutture rigide, lunghezza di circa 4km;
3. il tratto a sud della Torre fino a Silvi, contraddistinto dalla presenza di tre torrenti e dalla presenza di opere rigide di difesa nella porzione prossima alla foce del Piomba e del Saline, lunghezza di circa 8km.

L'intero tratto litoraneo, ad andamento rettilineo, presenta un'orientazione media di NNO-SSE che la espone alle ondate di Bora con un angolo minore rispetto quelle di Scirocco. Generalmente il trasporto netto è diretto verso sud.

Come evidenziato nel paragrafo 3, l'area litoranea gestita dall'AMP assume un'importanza naturalistica e socio-economica strategica a livello regionale.

4.3.1 Siti di video-monitoraggio costiero nel AMP-TDC

Nella primavera del 2016 è stata installata presso il tetto di Torre del Cerrano una stazione di video-monitoraggio per inquadrare il litorale compreso nell'area Core dell'AMP ([figura 25](#)).



Figure 25. Visione orto-rettificata della spiaggia a Nord della Torre del Cerrano durante una mareggiata.

Il litorale osservato si contraddistingue per ospitare una spiaggia sabbiosa a debole pendenza contraddistinta da un modesto apparato dunale e almeno da 3 ordini di barre sommerse. Il tratto analizzato è privo di strutture di difesa, presenti però nelle porzioni limitrofe immediatamente fuori dell'area protetta. La granulometria della spiaggia ricade al limite tra sabbie medie e sabbie fini.

Il sistema spiaggia/fondali osservato dalla stazione TorreCerrano01

La spiaggia di AMP-TDC, similmente a quella del PNC e PNG, è contraddistinta da cicli evolutivi autonomi dei fondali, descritti precedentemente e denominati NOM (net offshore migration), ben evidenziati dalla scomparsa della barra più esterna nella prima metà del 2017 a seguito di importanti mareggiate (si veda il pannello superiore di [figura 26](#)). Tali condizioni energetiche innescano sia la “scomparsa” della barra più esterna (terza barra di [figura 26](#)) che la successiva lenta migrazione di tutte le barre più interne (seconda e prima barra di [figura 26](#)).

In particolare la “seconda barra” impiega due anni per riposizionarsi alla stessa distanza da riva di quella che nel 2017 rappresentava la barra più esterna. A tale ulteriore “scatto” si associa anche la genesi di una nuova barra vicino riva (inizio 2019) che ripristina il sistema a 3 barre. La linea di riva registra un arretramento contestuale a tale transizione, ma comunque ristabilendo le ampiezze di spiaggia coerenti a quelle del 2017.

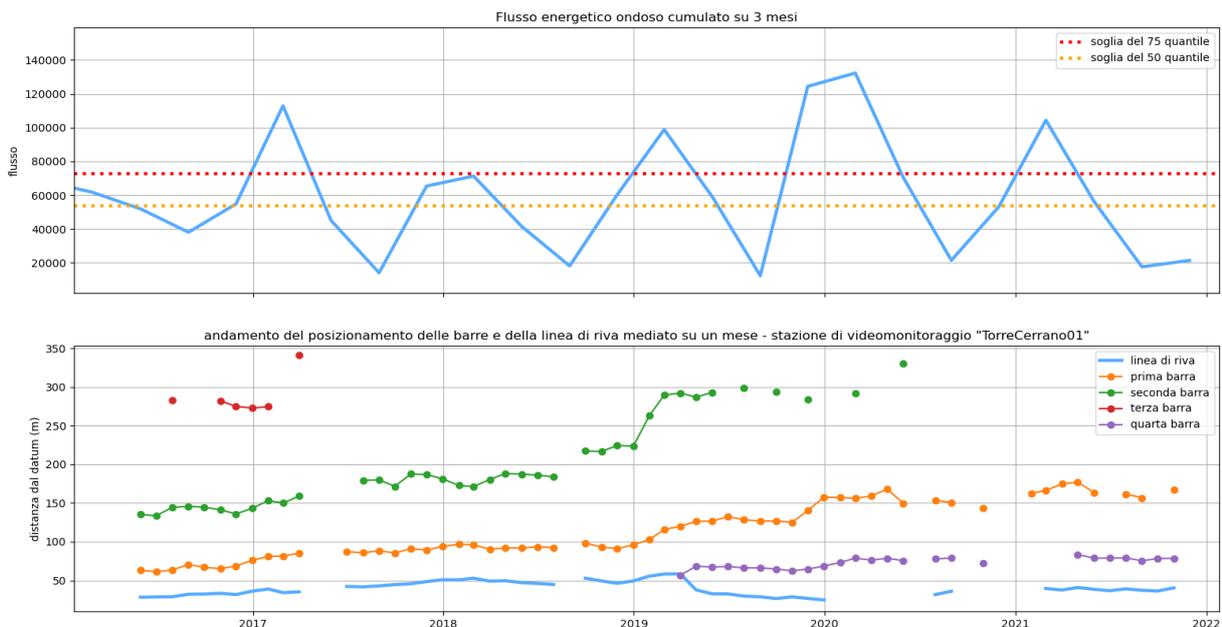


Figure 26. Pannello superiore: flusso energetico ondoso cumulato trimestralmente; Pannello inferiore: evoluzione del sistema spiaggia di Torre del Cerrano desunto da dati di videomonitoraggio.

È importante notare che il contributo energetico ondoso che ha interessato i comportamenti della spiaggia dal 2016 al 2021 è contraddistinto da una successione di periodi più o meno energetici che bene si correlano ai rispettivi “adattamenti” dei fondali.

4.3.2 L'andamento di lungo termine della spiaggia del AMP-TDC

L'accesso alle immagini satellitari disponibili a partire dal 2000 ha permesso di analizzare il comportamento del litorale centro adriatico nella porzione dell'AMP-TDC e quindi contestualizzare le risultanze derivanti dall'analisi puntuale della spiaggia di Torre Cerrano al contesto di area vasta del litorale compreso tra Vomano e Saline, all'interno del quale si localizza l'area marina protetta di AMP-TDC.

Per semplificare l'interpretazione dei dati estratti secondo quanto descritto all'inizio del paragrafo 4, si è proceduti ad accorpare le risultanze per sub-unità fisiografiche come precedentemente riportato all'inizio del paragrafo 4.2 e graficato in **figura 27**.



Figure 27. Areali utilizzati per analizzare il comportamento aggregato della linea di riva estratta dai dati satellitari.

L'andamento della linea di riva è stato ulteriormente analizzato scomponendo il segnale di lungo periodo (trend), quello stagionale e quello residuo (figura 28).

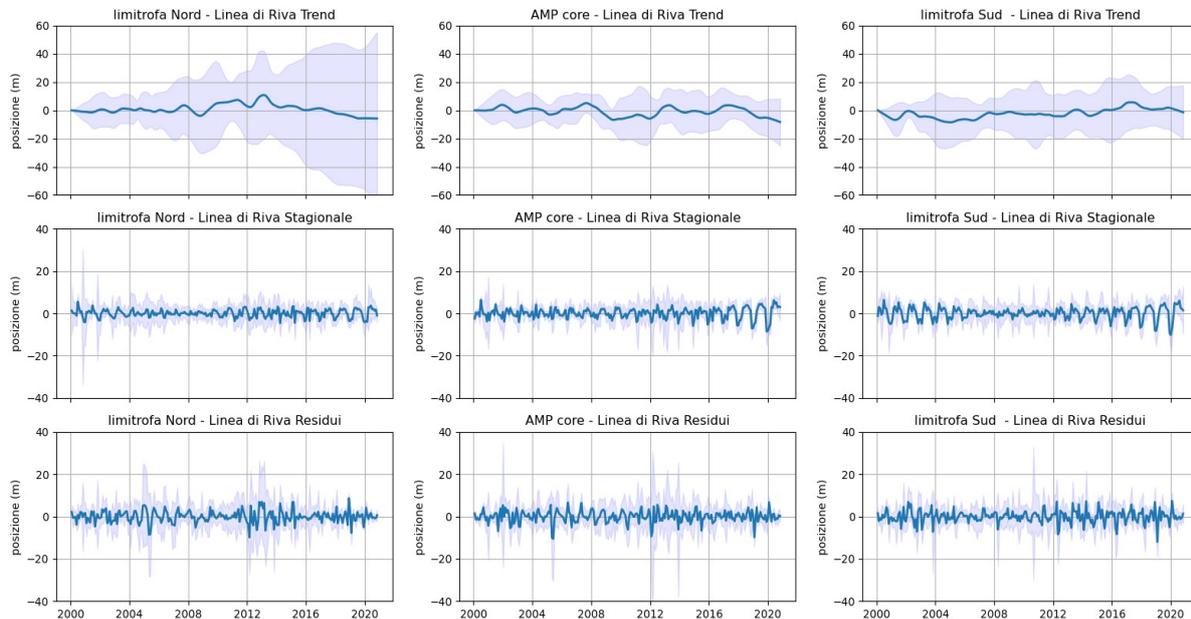


Figure 28. Andamento della linea di riva e rispettivi componenti per le tre sub-unità del AMP-TDC.

Il dato di lungo periodo ci fornisce un'indicazione del comportamento così detto di “fondo” dei tratti litoranei analizzati, ovvero ci indica se nei suddetti tratti sono presenti trend di erosione o di accrescimento. Per ogni componente è stato calcolato, e con riferimento a figura 28:

- il valore medio della sub-unità, riportato con la linea blu;
- l'involuppo delle risultanze ottenute per singolo transetto di misura, riportato con l'area ombreggiata viola.

Tale aggregazione ha permesso di valutare lo scostamento tra il valore medio e quello ottenuto dai singoli transetti di misura e quindi indagare quanto omogeneamente si comportasse la sub-unità indagata. In definitiva è stato analizzato l'andamento temporale e spaziale del comportamento della linea di riva per singola sub-unità.

Il dato più importante, a livello di trend della linea di riva (pannelli superiori della figura 28), è che nelle tre sub-unità la linea di riva mediata mostra un andamento meno stabile delle aree PNC e PNG. Se ci si riferisce all'involuppo (aree ombreggiate in violetto di figura 28), il comportamento è molto differenziato e suggerisce interessanti considerazioni sull'evoluzione recente dei tre tratti litoranei:



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



- a) la porzione “limitrofa Nord”, su cui presenti più interventi di difesa rigida, mostra un inviluppo simile alla porzione infrastrutturata dell PNC, ovvero contraddistinto da un’espansione dei range di variazione a seguito del 2013, presumibilmente in relazione ad interventi di difesa costiera che hanno modificato sensibilmente il trasporto litoraneo, generando aree a forte deposizione ed altre a forte erosione;
- b) la porzione “core” mostra i range di variazione più bassi, $\pm 10m$, tra le sub-unità;
- c) la porzione “limitrofa Sud”, si comporta similmente alla porzione di “core” sebbene contraddistinta dai maggiori valori dell’inviluppo ($\pm 20m$), ad indicare che anche in questo tratto le variazioni di lungo periodo sono state maggiori sia in fase di avanzamento che arretramento.

L’analisi della componente stagionale (pannelli intermedi) fornisce un’ulteriore indicazione sul grado di “libertà di evoluzione del litorale”, ovvero:

- d) l’andamento della componente stagionale mostra un andamento simile nelle sub-unità “core” e “limitrofa Sud”;
- e) l’andamento dei residui (pannelli inferiori) non evidenzia differenze comportamentali tra le sub-unità.

4.3.3 Considerazioni conclusive

In un quadro di sintesi si ritiene di poter ritenere verosimilmente corroborati dalle osservazioni i seguenti concetti:

1. la mobilità e lo scambio di sedimento tra le barre e la linea di riva sono fenomeni che caratterizzano in maniera importante l’evoluzione della porzione di litorale di afferente all’AMP-TDC, come osservato dalle centraline di video-monitoraggio;
2. la spiaggia di Torre del Cerrano è soggetta a “cicli autonomi” di variazione dell’assetto dei fondali e di quanto questi riescano a dissipare l’energia ondosa incidente.

Declinando i concetti tecnico/scientifici in termini utili in ambito di gestione della costa è possibile schematizzare le fenomenologie erosivo/deposizionali in maniera differenziata tra le sub-unità che costituiscono il litorale del AMP-TDC:

- i. il comportamento della porzione di litorale “core” è tipico di un sistema resiliente, sebbene si localizzi al limite tra i due tratti attigui in cui l’artificializzazione del litorale influenza sensibilmente le capacità di trasporto sedimentario lungo costa;
- ii. la porzione “limitrofa Nord” è contraddistinta dalle maggiori disomogeneità del comportamento della linea di riva, probabilmente legate alla limitata capacità di riequilibrio sedimentario lungo costa.

4.4 Comparazione delle risultanze sui siti

-
- importanza dei corpi sedimentari barre alla scala regionale, esempio di quantificazione di volume dell'outer bar
- la maggior parte della fascia 0-100m da riva è soggetta da movimentazione importante e alimenta le barre esterne, no ai microripascimenti
- i stages del posizionamento della outerbar (NOM) influenzano enormemente le fenomenologie erosive, intervenire senza sapere l'esistenza di questi cicli può essere molto controproducente

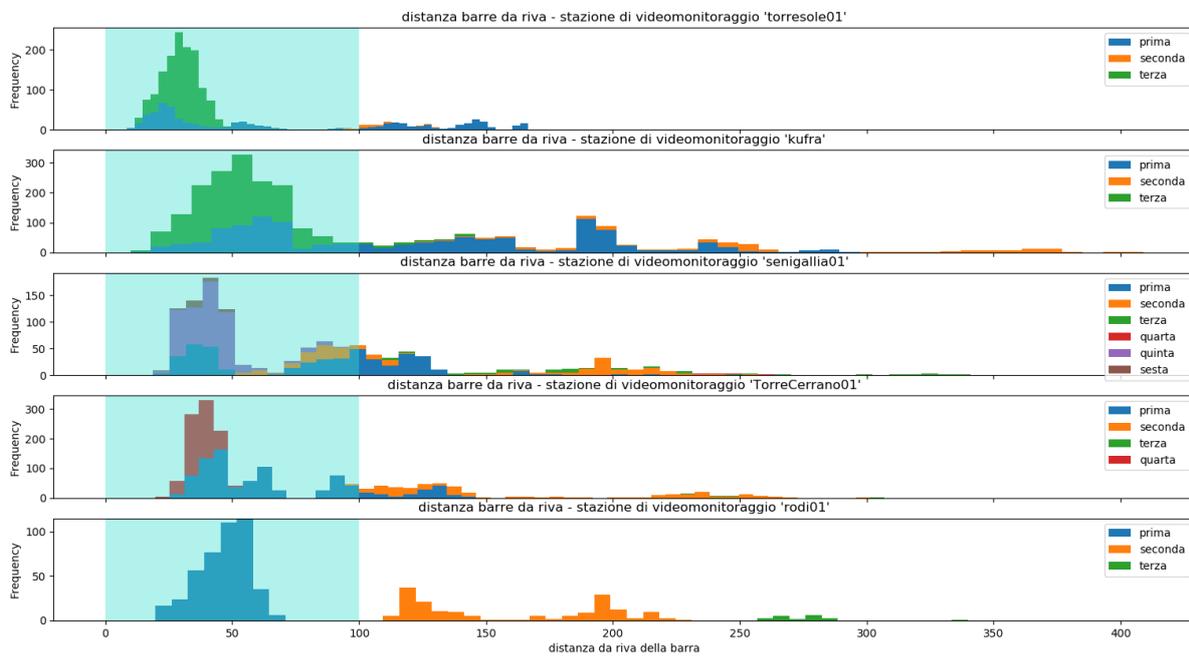


Figure 29

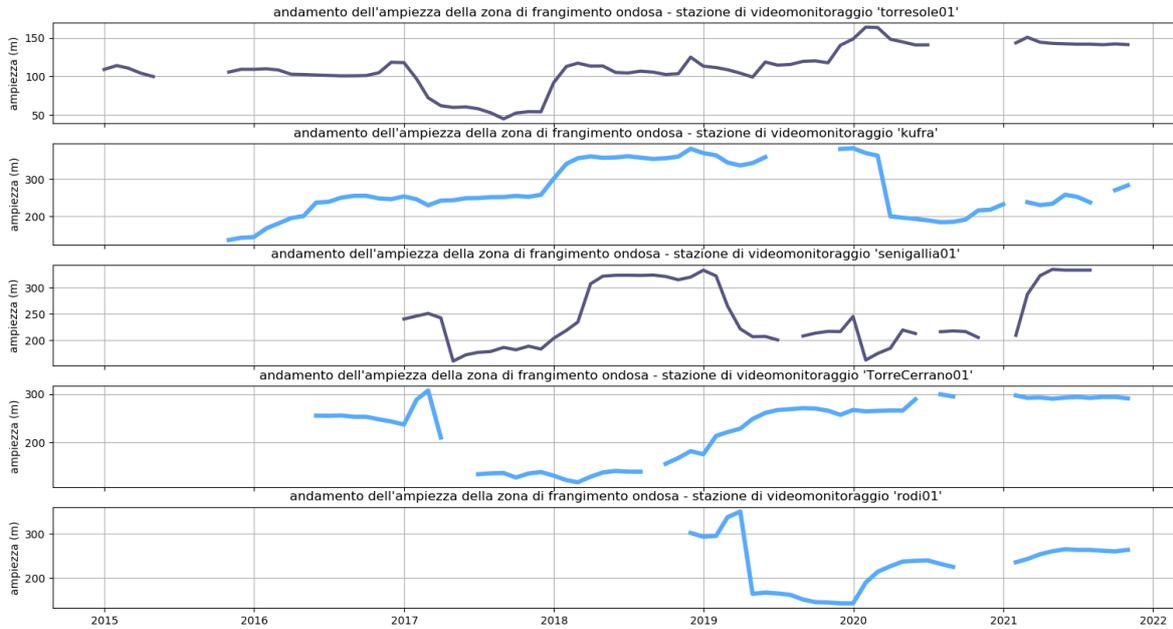


Figure 30

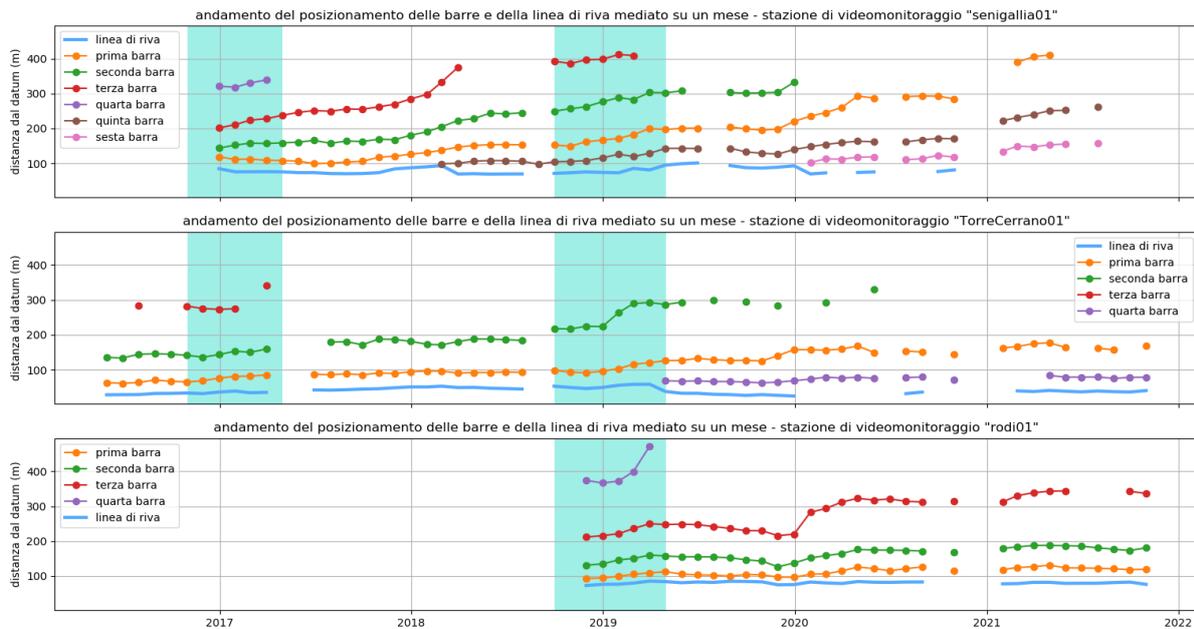


Figure 31



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente

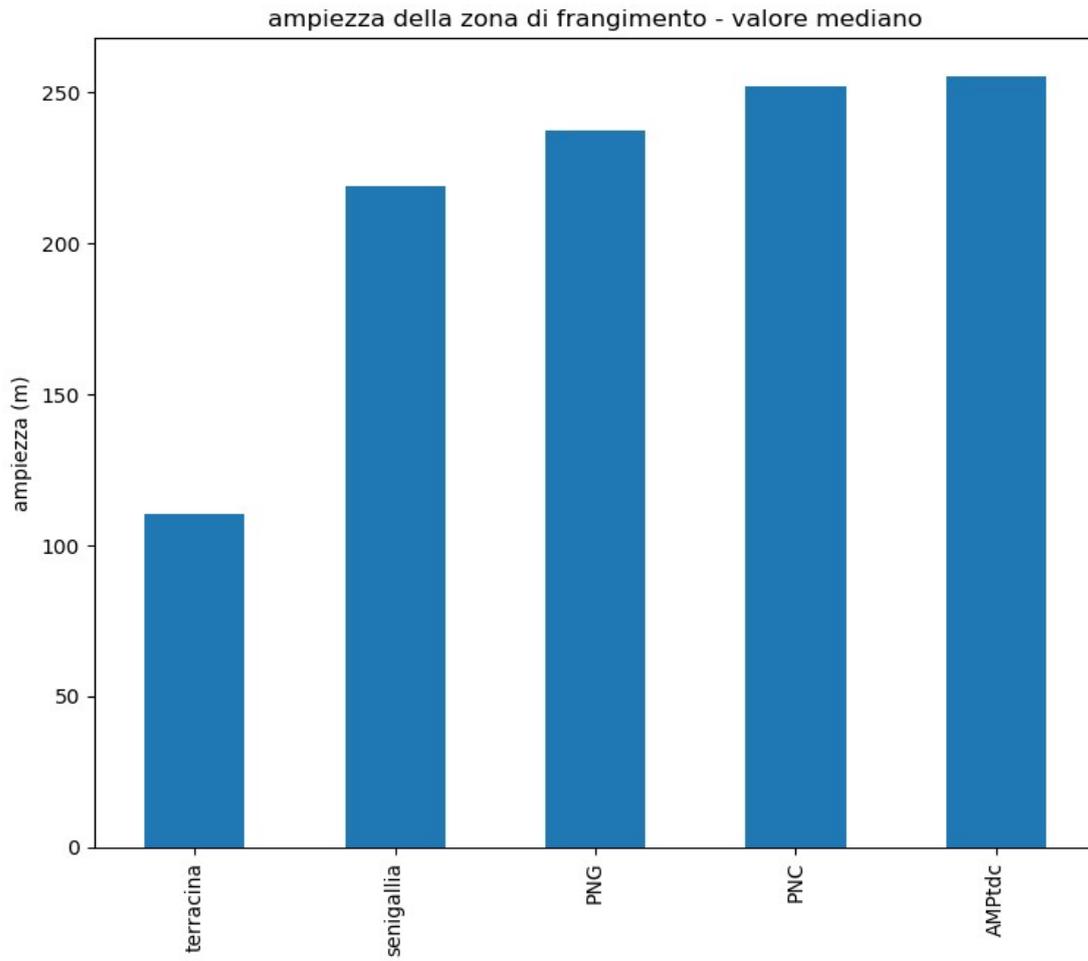


Figure 32



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



4.5 La simulazione del servizio ecosistemico di protezione costiera

Questa linea di attività è stata sperimentata nel sito afferente al PNC e sviluppata dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche in collaborazione con ISPRA, nell'ambito di una collaborazione scientifica tra l'Ente Parco Nazionale del Circeo e l'Università Politecnica delle Marche. Di seguito si riportano gli estratti dai report inviati al PNC dall'Università Politecnica delle Marche in merito alla **stima del livello di inondazione costiera** che ci si può ragionevolmente attendere su una fascia costiera di interesse, a seguito di un attacco ondoso di caratteristiche predeterminate.

L'utilizzo di modelli numerici ha permesso quindi di analizzare l'influenza della morfologia costiera, e in particolare delle **barre sommerse**, che svolgono una comprovata azione protettiva sulla costa. Nel contesto della procedura adottata, è stato scelto XBeach (Roelvink et al., 2009) quale modello numerico per le simulazioni di propagazione ondosa. La scelta risponde a molteplici motivazioni. Prima di tutto, XBeach è un progetto *open source* e di pubblico dominio: i codici sorgente e i file eseguibili del modello sono liberamente scaricabili all'indirizzo <https://oss.deltares.nl/web/xbeach/>, e sono pertanto usufruibili da istituti di ricerca ed enti pubblici senza alcun costo. XBeach è inoltre di semplice utilizzo e, nella sua formulazione mono-dimensionale, consente di simulare scenari di propagazione di molte ore in tempi ragionevoli. Infine, XBeach è adoperato da svariate istituzioni nel mondo e le sue performance sono continuamente esaminate e validate attraverso pubblicazioni scientifiche. XBeach è stato adoperato per eseguire una **campagna di simulazioni numeriche**, consistente in un insieme di esperimenti (simulazioni) al computer atti a ricreare la risposta della costa di Sabaudia alle varie condizioni ondose. Ad ognuna di queste simulazioni, caratterizzata da un differente clima ondoso (in termini di altezza d'onda significativa e periodo di picco), è stato quindi associato un valore rappresentativo dell'ampiezza dell'inondazione costiera che ogni simulazione ha manifestato.

L'inondazione costiera è stata scelta come parametro obiettivo del metodo, poiché si pone come l'ideale punto d'incontro tra i diversi aspetti tecnici coinvolti. Essa è, infatti, un indicatore di immediata interpretazione, facilmente identificabile dalle immagini di video-monitoraggio e altrettanto facilmente indagabile attraverso i metodi della modellazione numerica.

In risposta alle esigenze pratiche degli stakeholder, la procedura è stata concepita per essere di semplice implementazione ed applicazione, e può essere attuata utilizzando software gratuiti e liberamente accessibili.

La definizione di qualsiasi sistema informatico utile alla valutazione della protezione costiera non può prescindere dalla conoscenza delle **caratteristiche morfologiche della costa** che si vuole studiare come la pendenza del fondale, la presenza e il numero delle barre sottomarine, la profondità media dell'acqua in una fascia costiera di interesse.



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Le conseguenze dell'azione ondosa sulla spiaggia emersa, e di riflesso su tutte le strutture naturali e artificiali che vi afferiscono, sono infatti il risultato ultimo di complesse interazioni che le onde instaurano continuamente con il fondale marino. Il contenuto energetico delle onde generate in mare aperto viene fortemente ridotto e modulato nel loro viaggio verso la costa, principalmente in virtù della decrescente profondità dell'acqua, che le porta a irripidirsi, frangere e perdere energia sotto forma di turbolenza. In questo processo le barre sottomarine sono di cruciale importanza, poiché sono regioni in cui la profondità dell'acqua si riduce in maniera repentina e nelle quali si concentra una grande quantità di dissipazione. In altre parole, **l'impatto sulla spiaggia emersa viene influenzato dalla spiaggia sommersa**, quale frutto di un variegato sistema di influenze e interazioni che la modellistica numerica contribuisce in maniera sempre più determinante a chiarificare.

Allo scopo di investigare l'effetto della morfologia del fondale sulla **protezione costiera (CP)**, le informazioni sui fondali oggetto di studio devono essere adeguatamente fornite ai modelli numerici affinché questi ne possano tener conto nella simulazione dei processi di dissipazione ondosa e inondazione costiera. Per definire il fondale modello da usare per le simulazioni numeriche, sono stati usati dati provenienti da una campagna batimetrica *in situ* eseguita nell'ottobre 2019 lungo il litorale afferente al PNC, con il supporto tecnico dell'Ente Parco (**figura 33**). In questa prima fase, è stato utilizzato il profilo costiero acquisito nei pressi della stazione di video-monitoraggio ISPRA (*Kufra*) per calibrare le procedure di simulazione. Una volta calibrato il modello sono state costituite tre diverse tipologie di fondale per la zona costiera di Sabaudia:

1. un profilo costiero misurato, dotato di due-tre barre ben formate (*fondale con barra*; linea nera continua in **figura 34**);
2. un profilo costiero misurato, al quale è stata rimossa la barra intermedia (*fondale senza barra*; linea nera tratteggiata in **figura 34**);
3. un profilo denominato "di equilibrio", al quale è stato completamente rimosso il sistema di barre (*fondale "di equilibrio"*; linea nera punteggiata in **figura 34**).

Il fondale senza barra ci ha consentito di **investigare l'effetto dell'assenza di una specifica barra rispetto alla situazione originale** (in cui tutte le barre sono presenti). *Il fondale "di equilibrio", non presentando alcuna barra, ci ha permesso di osservare le conseguenze di un fondale completamente privo di protezione costiera (aggiuntiva rispetto alla dissipazione naturalmente presente in virtù della riduzione graduale della profondità dell'acqua).*

Ognuno dei tre profili sopra descritti è stato sollecitato con tre differenti condizioni ondose, di intensità crescente:

- a) clima ondoso di bassa intensità (altezza d'onda = 1 m; periodo d'onda = 6.3 sec);
- b) clima ondoso di moderata intensità (altezza d'onda = 2.5 m; periodo d'onda = 8.5 sec);
- c) clima ondoso di alta intensità (altezza d'onda = 4.2 m; periodo d'onda = 9.2 sec).



Figura 33. Imbarcazione utilizzata per le analisi, condotta dal personale tecnico del PNC.

È stata inoltre simulata l'estensione significativa dell'inondazione costiera modellata da ognuna delle simulazioni per constatare la performance di protezione costiera di ogni profilo.

Al fine di osservare le capacità dissipative dei tre profili, controlliamo l'evoluzione dell'altezza significativa in tre punti significativi del profilo (si faccia riferimento alla [figura 34](#) per le posizioni):

- a $x = 700$ m (in corrispondenza dell'inizio della barra intermedia), dove si assume che il processo dissipativo sulla barra abbia inizio;
- a $x = 760$ m (in corrispondenza del cavo successivo alla barra), dove si assume che il processo dissipativo sulla barra sia giunto al termine;
- a $x = 820$ m, punto dove possiamo misurare l'energia residua del moto ondoso che poi si ripercuoterà sulla spiaggia sotto forma di inondazione.

Misuriamo, infine, l'estensione significativa dell'inondazione costiera R_{sig} modellata da ognuna delle nove simulazioni per constatare la performance di protezione costiera di ogni profilo.

Nella Tabella 4 sono riportati, per ognuna delle nove simulazioni, i valori di H_s ai tre punti caratteristici sopra citati, nonché il valore di $runup$ significativo modellato. Per quanto riguarda H_s (prime tre colonne numeriche), in parentesi sono riportate le percentuali di riduzione (o aumento di H_s) rispetto al valore simulato a $x = 700$ m. Per i valori di R_{sig} (ultima colonna), in parentesi è indicata la percentuale di riduzione (o aumento) di R_{sig} che la simulazione con profilo "di equilibrio" ha subito rispetto alla corrispondente simulazione con profilo con barra.

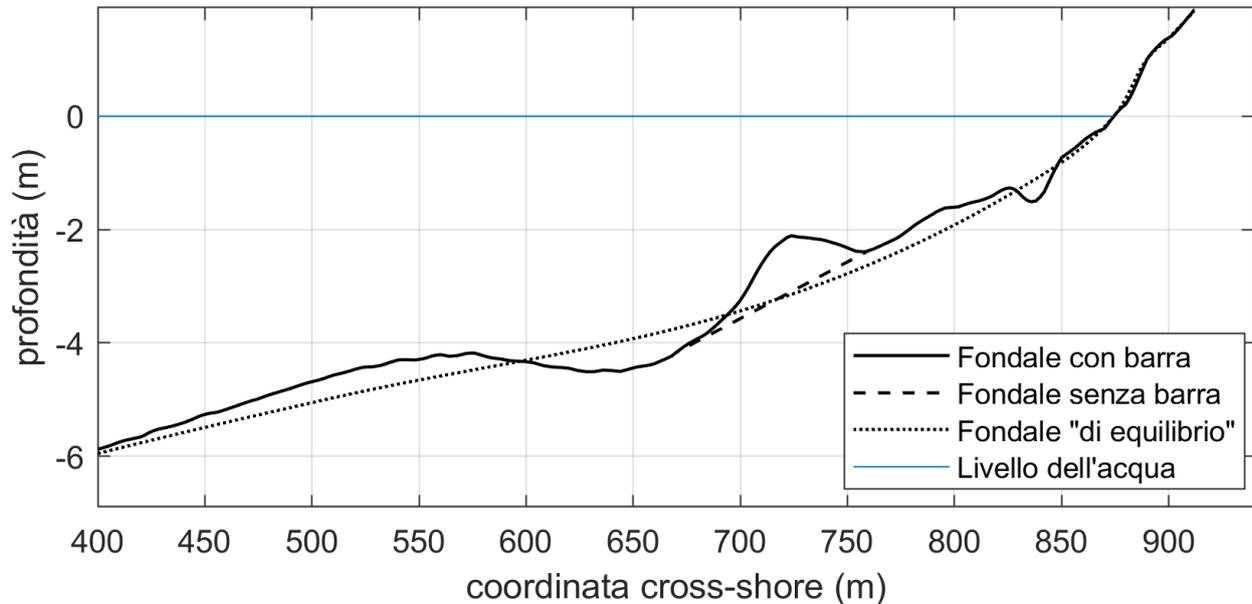


Figure 34. I tre profili utilizzati per le simulazioni di valutazione dell'effetto delle barre sottomarine.

È possibile osservare che, con clima ondoso di modesta intensità (clima A), il modello XBeach simula una riduzione dell'altezza significativa H_s prossima allo zero attraverso la barra intermedia. L'assenza della barra intermedia o la completa assenza delle barre, di contro, causa addirittura un leggero incremento di H_s (+4% con l'assenza della sola barra intermedia, +2% con totale assenza del sistema di barre). I valori di R_{sig} sono paragonabili tra i tre profili con clima A, a indicare che le barre di Sabaudia tendono ad essere inattive con climi ondosi di altezza significativa prossima a 1 m.

L'effetto dell'assenza della barra intermedia è, al contrario, molto evidente in caso di clima ondoso moderato (clima B) e intenso (clima C). La barra intermedia causa, infatti, una dissipazione globale del 36% di H_s con clima B e del 31% con clima C. In assenza della barra intermedia, l'abbattimento delle onde scende al 16-17%. Infine, l'assenza di una o più barre può prodursi in un incremento dell'inondazione significativa R_{sig} dell'ordine del 7% per climi ondosi moderati e del 12% per climi ondosi intensi.

La trasformazione dell'altezza significativa descritta numericamente nella Tabella 4 è rappresentata visivamente nelle figure 35, 36 e 37, nelle quali le linee colorate mostrano il decadimento di H_s sui tre diversi profili, in caso di clima ondoso poco intenso (figura 35), moderato (figura 36) e intenso (figura 37), rispettivamente. Dalle figure risulta evidente come la barra incida in maniera importante sull'abbattimento di H_s , in particolar modo nella regione immediatamente retrostante la barra stessa ($x = 720-760$ m) e per i climi ondosi più energetici.

ALTEZZA ONDOSA ALLA COORDINATA		x = 700m	x = 760m	x = 820m	Runup R_{sig}
CLIMA A	Con barra	0.86 m	0.85 m (-1%)	0.78 m (-10%)	12.00 m
	Senza barra	0.85 m	0.89 m (+4%)	0.80 m (-6%)	12.22 m
	Prof. equilibrio	0.85 m	0.87 m (+2%)	0.87 m (+2%)	11.70 m (-2%)
CLIMA B	Con barra	2.25 m	1.44 m (-36%)	1.04 m (-54%)	36.16 m
	Senza barra	2.23 m	1.87 m (-16%)	1.14 m (-49%)	37.16 m
	Prof. equilibrio	2.22 m	1.92 m (-13%)	1.30 m (-41%)	38.50 m (+7%)
CLIMA C	Con barra	2.29 m	1.57 m (-31%)	1.12 m (-51%)	38.17 m
	Senza barra	2.28 m	1.89 m (-17%)	1.23 m (-46%)	39.36 m
	Prof. equilibrio	2.28 m	1.87 m (-18%)	1.35 m (-41%)	42.61 m (+12%)

Tabella 4: valori modellati di H_s a tre posizioni caratteristiche, ed estensione del runup significativo per le nove simulazioni considerate.

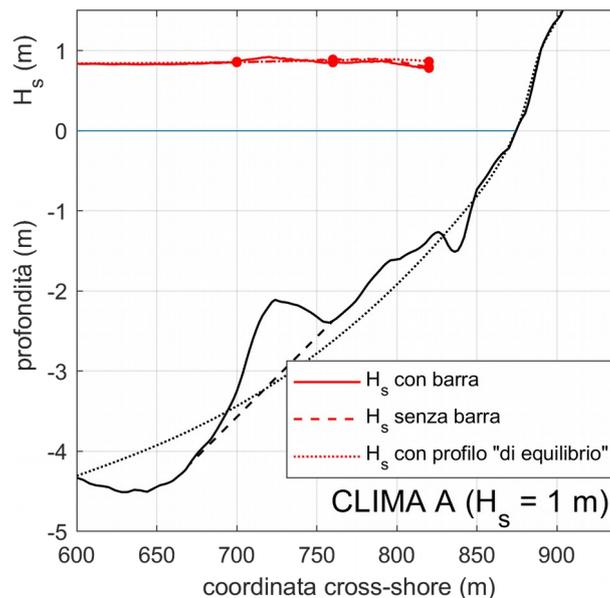


Figure 35. Andamento dell'altezza significativa H_s sulle tre batimetrie di **figura 34** per clima ondoso poco intenso ($H_s = 1$ m al largo). I pallini indicano la posizione dei tre punti significativi a cui fanno riferimento i valori della Tabella 4 ($x = 700, 760, 820$ m)

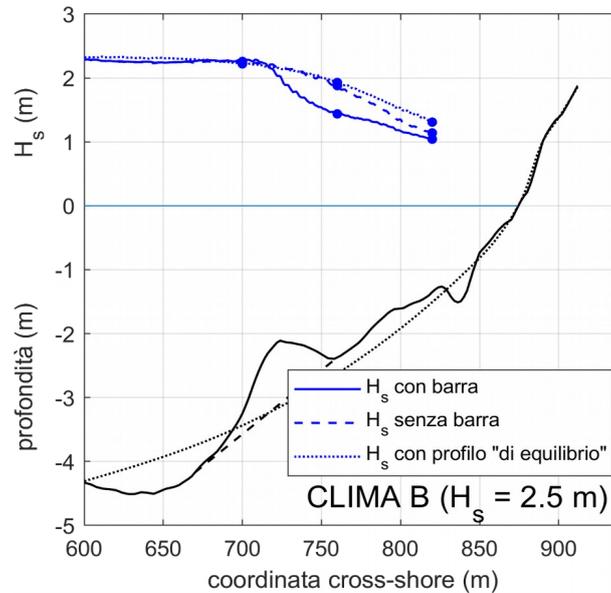


Figure 36. Andamento dell'altezza significativa H_s sulle tre batimetrie di figura 34 per clima ondoso moderato ($H_s = 2.5$ m al largo). I pallini indicano la posizione dei tre punti significativi a cui fanno riferimento i valori della Tabella 4 ($x = 700, 760, 820$ m)

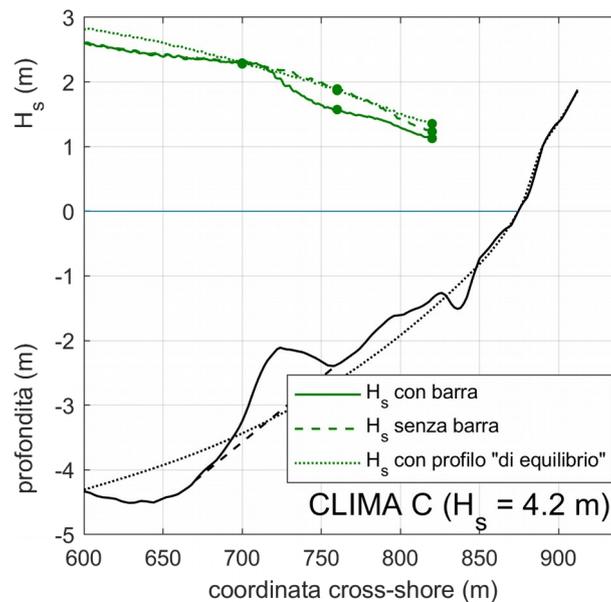
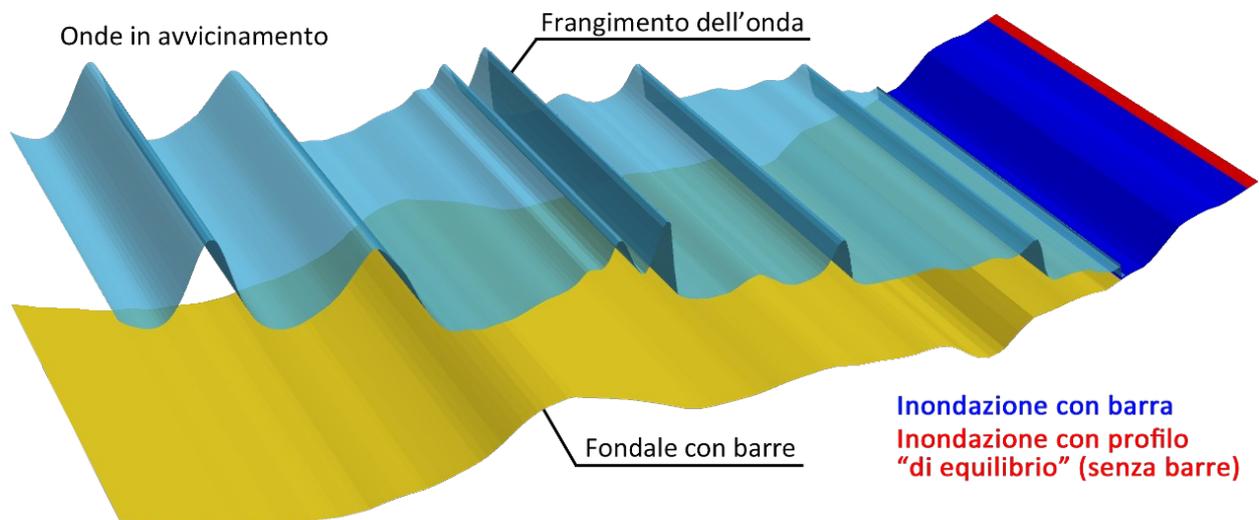


Figure 37. Andamento dell'altezza significativa H_s sulle tre batimetrie di figura 34 per clima ondoso intenso ($H_s = 4.2$ m al largo). I pallini indicano la posizione dei tre punti significativi a cui fanno riferimento i valori della Tabella 4 ($x = 700, 760, 820$ m)

Una rappresentazione visiva dei processi ondosi modellati e dell'incremento dell'inondazione significativa è mostrata in **figura 38**, in cui è riportato un frame rappresentativo di una simulazione ondosa con clima moderato (clima B; $H_s = 2.5$ m) su un profilo batimetrico modellato sulla costa di Sabaudia. Si noti la chiara trasformazione dell'onda al punto di frangimento, sopra la barra; le onde, da globalmente regolari e simmetriche, diventano più ripide e sviluppano un fronte ondosso approssimativamente verticale. Dopo il frangimento, le onde abbattano significativamente la loro altezza ed energia.

Sulla parte emersa della spiaggia sono riportate le estensioni significative (statistiche) delle inondazioni per la batimetria con barra (in blu) e per la batimetria "di equilibrio", in cui l'intero sistema di barre è rimosso (in rosso).



*Figure 38. Rappresentazione grafica dei processi di trasformazione dell'onda e dell'inondazione significativa per clima ondoso medio ($H_s = 2.5$ m). In blu è indicata l'inondazione significativa del profilo con barra; in rosso quella del profilo "di equilibrio".
Nota: la scala verticale è esasperata rispetto a quella orizzontale.*

In conclusione, il modello XBeach può essere proficuamente sfruttato per mostrare come l'assenza di una o più barre sottomarine nel contesto costiero specifico del PNC può potenzialmente causare un minore abbattimento dell'energia ondosa rispetto alla situazione con barra, di seguito quantificato:

- ✓ *abbattimento altezza d'onda del 15-20% senza barra*
- ✓ *abbattimento altezza d'onda del 30-35% con barra;*



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



**Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente**



5 Il bilancio ambientale

Il lavoro è stato eseguito dal Università degli Studi del Molise e i dati sono riportati integralmente nella relazione “Valutazione economica di differenti scenari di gestione della costa attraverso l’approccio dei servizi ecosistemici, con particolare riferimento all’erosione costiera” inviata ufficialmente al committente Ente Parco Nazionale del Circeo dai responsabili della convenzione dell’Università del Molise.

ISPRA ha partecipato alla realizzazione di questo studio con parte delle risultanze riportate nel presente report.



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



**Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente**



6 Conclusioni e raccomandazioni gestionali

- in linea di massima ripascere le barre è il modo migliore per intervenire, riportare il valore economico del volume delle barre
- gestione di area vasta, sostenere le aree protette a livello della programmazione regionale
- Importanza della frequenza temporale di analisi
- importanza della direzionalità
- oimportanza del dato osservativo e dei presidi per la conoscenza



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



7 Riferimenti bibliografici

Battjes, J. *Surf similarity*. In Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers, Copenhagen, Denmark, 24–28 June 1974.

Parlagreco, L., Melito, L., Devoti, S., Perugini, E., Soldini, L., Zitti, G., Brocchini, M. *Monitoring for Coastal Resilience: Preliminary Data from Five Italian Sandy Beaches*. *Sensors*. 2019, 19(8).

Ruessink, B.; Pape, L.; Turner, I. *Daily to interannual cross-shore sandbar migration: Observations from a multiple sandbar system*. *Cont. Shelf Res.* 2009, 29, 1663–1677

Shand, R.; Bailey, D.; Shepherd, M. *An inter-site comparison of net offshore bar migration characteristics and environmental conditions*. *J. Coast. Res.* 1999, 15, 750–765.

Wijnberg, K.M.; Terwindt, J.H. *Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis*. *Mar. Geol.* 1995, 126, 301–330.

Wright, L.; Short, A. *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis*. *Mar. Geol.* 1984, 56, 93–118