



Università della Calabria

**Dottorato di Ricerca in
Scienze e Ingegneria dell'Ambiente, delle Costruzioni e dell'Energia**

Settore Scientifico Disciplinare SSD – ICAR02

Tesi

***Analisi, previsione e metodologia innovativa
per la gestione del rischio costiero da mare –
Il caso studio di Belvedere Marittimo (CS)***

Supervisor

Tutor: Prof. Mario Maiolo



Firma oscurata in base alle linee guida del Garante della privacy

Candidato

Salvatore Sinopoli



Firma oscurata in base alle linee guida del Garante della privacy

Co-Tutor: Riccardo Alvisè Mel



Firma oscurata in base alle linee guida del Garante della privacy

Ciclo XXXV

Il Coordinatore del Corso di Dottorato

Prof. Salvatore Critelli



Critelli Salvatore

14.04.2023

13:51:39

GMT+02:00

A.A. XXXV



Università della Calabria

Dottorato di ricerca in Scienze e Ingegneria dell'Ambiente, delle Costruzioni e dell'Energia

Analisi, previsione e metodologia innovativa per la gestione del rischio costiero da mare – il Caso studio di Belvedere Marittimo (CS)

Settore Scientifico Disciplinare ICAR/02

Supervisore

Candidato

**Prof. Mario Maiolo
Riccardo Alvise Mel**

Salvatore Sinopoli

Coordinatore

Prof. Salvatore Critelli

Abstract.

I numerosi episodi di allagamenti ed i continui fenomeni di arretramento delle spiagge espongono ad elevato rischio abitanti e beni presenti sulle coste. Le mareggiate influenzano l'evoluzione e la vita delle comunità costiere, e in aggiunta i cambiamenti climatici introducono elementi di aggravio, evidenziando una sfida amministrativa per la protezione e la gestione di questi territori. L'esempio fornito da opere di difesa costiera già presenti sul territorio calabrese e l'analisi dell'efficacia e degli effetti da esse prodotti ha permesso di individuare nel ripascimento protetto di Calabria a Belvedere Marittimo (CS) un caso studio significativo, che da venti anni protegge la spiaggia e il vicino centro abitato. Per comprendere meglio le caratteristiche dell'opera e la sua applicabilità sono state quindi condotte delle campagne di indagine ed acquisizione dati, che hanno permesso di ricostruire digitalmente l'opera e di analizzarla attraverso il modello numerico MIKE-21FM. Le analisi hanno permesso di evidenziare i limiti ed i pregi di questa tipologia di opera, quantificandone il campo di applicabilità. Inoltre i dati acquisiti durante le campagne di indagine hanno permesso di estendere l'analisi a tutto il paraggio dell'area Diamante-Bonifati sotto l'aspetto sia morfologico che climatico, ricostruendo eventi estremi che nel tempo si sono abbattuti sulla costa, modellandone di futuri in relazione ai possibili cambiamenti climatici, e fornendo quindi una metodologia di simulazione e di analisi per le strategie di mitigazione dei rischi costieri.

1. Introduzione	1
2. Dinamica costiera e interventi di protezione	13
2.1 Interventi di protezione costiera in emergenza con opere rigide	15
2.2. Interventi a basso impatto ambientale e di rinaturalizzazione delle difese degli arenili	20
3. Individuazione del caso di studio: la spiaggia di Calabaia di Belvedere Marittimo sulla costa tirrenica cosentina	26
3.1. L'area tirrenica meridionale della provincia di Cosenza	32
3.1.1 <i>Inquadramento morfologico e geografico</i>	33
3.1.2 <i>Patrimonio storico-turistico ed ecologico</i>	36
3.1.3 <i>Politiche regionali per la mitigazione del rischio costiero</i>	39
3.2. Intervento di riqualificazione a basso impatto ambientale: il ripascimento protetto di Calabaia	43
3.2.1 <i>Le successive fasi di monitoraggio dell'intervento</i>	47
3.2.3 <i>Le analisi modellistiche svolte sull'intervento</i>	51
4. Metodi numerici per la modellazione bidimensionale dei fenomeni costieri	55
4.1 La modellazione idraulica marittima attraverso il software MIKE 21-3FM	57
4.2 La Modellazione degli effetti delle barriere sommerse sui fenomeni d'onda	61
4.3 Il modello accoppiato SWAN-2DEF	63

5. Metodologie di raccolta dati e integrazione di data-set per la caratterizzazione della morfologia dell'area del caso studio	65
5.1 Raccolta di informazioni di tipo plano-batimetrico e creazione per il caso studio di una griglia di calcolo dettagliata.	66
5.1.1 <i>Dati batimetrici di largo provenienti dal data-set EMODnet.</i>	67
5.1.2 <i>Campagne di raccolta di informazioni di tipo plano-batimetrico.</i>	69
5.2 Integrazione dei dataset plano-batimetrici e costruzione della griglia di calcolo dettagliata per il paraggio Diamante-Bonifati.	70
6. Individuazione delle informazioni sul clima locale e caratterizzazione meteo-climatica dell'area del caso studio.	73
6.1 Set di dati disponibili	75
6.1.1 <i>Dati Provenienti dalla boa di Cetraro</i>	75
6.1.2 <i>Dati provenienti dal modello hindcast ERA5</i>	76
6.1.3 <i>Interpretazione e integrazione dei dati attraverso il modello WAM</i>	76
6.2 Metodologia di acquisizione e confronto dei dati	77
6.2.1 <i>Validazione dei dati provenienti da ERA5 rispetto alla Boa di Cetraro</i>	78
6.2.2. <i>Confronto ERA5 – WAM</i>	80
6.2.3. <i>Confronto ERA5 – WAM – Boa di Cetraro</i>	82
6.3 Caratterizzazione Meteoclimatica derivante dalle analisi	83
6.3.1 <i>Climatologia del vento e delle onde off-shore</i>	83
6.3.2 <i>Variabilità stagionale</i>	84

6.3.3 <i>Analisi delle tendenze</i>	86
7. Modellazione numerica ed analisi sintetiche degli effetti delle barriere soffolte sui fenomeni d'onda	89
7.1 Impostazione del modello per le analisi di tipo sintetico	91
7.2 Analisi dei dati derivati dalle simulazioni di tipo sintetico	92
7.3 Simulazione di perdita di materiale dal ripascimento di Calabaia	98
8. Modellazione numerica e analisi degli eventi estremi che caratterizzano il paraggio Diamante-Bonifati	101
8.1 La mareggiata del 21 marzo 2018	101
8.2 Simulazione del massimo evento di forzante registrato sulla costa, la tempesta del dicembre 1999	107
8.2.1 <i>Struttura delle simulazioni</i>	109
8.2.2 <i>Confronto dei risultati tra il modello accoppiato 2DEF + SWAN e MIKE-21</i>	111
8.3 Sviluppo di proiezioni della pericolosità costiera dovute all'incremento del livello medio del mare	113
8.3.1 <i>Incremento di SLR ed effetti al fondo</i>	117
9. Conclusioni	121
Appendice	129
Bibliografia	131

1. Introduzione

Le comunità costiere hanno l'opportunità dello sfruttamento sostenibile del mare quale la risorsa centrale per lo sviluppo locale della Blue Growth (**Fedorov 2017; 2 Ertör, 2020**) e si trovano frequentemente a dover affrontare la minaccia dalla pressione urbana, dall'inquinamento marino, dai processi di erosione e dagli eventi alluvionali dovuti all'aumento del tasso di innalzamento relativo del livello del mare e delle mareggiate inasprite anche dai cambiamenti climatici.

Le aree costiere contengono un'ampia quantità di vita, fornendo, secondo le stime, il 43% dei servizi ecosistemici mondiali (**Jorve et al. 2014**) e fornendo benefici sociali, economici e ambientali alla crescente popolazione mondiale (**Costanza et al. 1997; OECD, 2017**). L'aumento della frequenza di eventi alluvionali estremi determinati dal cambiamento climatico è cruciale nella ricerca urbanistica attuale, in quanto rappresenta una delle principali sfide che la società del rischio globale dovrebbe affrontare (**Beck, 2013**). Il cambiamento climatico è alla base dei potenziali rischi marini futuri, poiché si prevede che l'effetto serra porti a un riscaldamento globale (**IPCC, 2013**).

La sfida da raccogliere, per perseguire un modello di sviluppo della Blue Economy, risiede quindi nella consapevolezza di queste minacce e nella capacità di sviluppare una pianificazione e gestione che ne tenga conto, individuando il corretto compromesso tra la protezione dalle inondazioni degli insediamenti urbani, le esigenze economiche del territorio e la tutela della biodiversità nell'ambiente.

Difatti lo sviluppo della Blue Growth determina una pressione sempre maggiore sull'intero ecosistema marino, e non soltanto sulla linea di costa o sul tratto di litorale più urbanizzato, rendendo necessarie attente analisi multidisciplinari (**Nuzula et al. 2017, Huang et al. 2019, Lamine et al. 2019**), per indirizzare la gestione delle attività economiche lungo traiettorie che consentano di sfruttare le risorse marine senza alterare lo stato dell'ambiente.

La progressiva diffusione del concetto di sostenibilità ha condizionato, ovviamente e con maggiore intensità, gli interventi di difesa costiera anche a seguito di puntuali interventi di diverse Istituzioni Internazionali, Enti ed Organizzazioni di ricerca e di governo nazionali (**World Bank, 1996; - EUROSION, 2004, - OECD 2016**).

Su questo indirizzo l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile, adottata dai Capi di Stato in occasione del Summit sullo Sviluppo Sostenibile del settembre 2015, fissa gli impegni per lo sviluppo sostenibile da realizzare appunto entro il 2030, individuando 17 Obiettivi (SDGs - Sustainable Development Goals) e 169 target.

L'Agenda 2030 riconosce lo stretto legame tra il benessere umano e la salute dei sistemi naturali e la presenza di sfide comuni che tutti i Paesi sono chiamati ad affrontare.

Gli SDGs hanno carattere universale - si rivolgono cioè tanto ai paesi in via di sviluppo quanto ai paesi avanzati - e sono fondati sull'integrazione tra le tre dimensioni dello sviluppo sostenibile (ambientale, sociale ed economica), quale presupposto per sradicare la povertà in tutte le sue forme. L'Agenda individua nel Foro politico di Alto Livello - High Level Political Forum il consesso globale per monitorare, valutare e orientare l'attuazione degli SDGs. Per supportare tale attività e garantire la comparabilità delle valutazioni, la Commissione Statistica delle Nazioni Unite ha costituito l'Inter Agency Expert Group on SDGs (IAEG-SDGs), con il compito di definire un insieme di indicatori per il monitoraggio dell'attuazione dell'Agenda 2030 a livello globale.

L'Obiettivo n.14 riguarda la salvaguardia degli oceani, dei mari e delle risorse marine per un loro sviluppo sostenibile: "la conservazione e lo sfruttamento sostenibile degli oceani, dei mari e di tutte quelle risorse al loro interno sono importanti per la nostra vita: la riduzione dell'inquinamento marino, così come una gestione sostenibile dell'ecosistema e una protezione dell'ambiente subacqueo sono obiettivi necessari per salvaguardare la nostra salute".

Tra le risoluzioni approvate a Nairobi, a marzo 2019, dall'Assemblea della Nazioni Unite, c'è stato il riconoscimento che un'economia globale più circolare possa contribuire in modo significativo al consumo e alla produzione sostenibili. Nell'ottica di proteggere gli oceani e gli ecosistemi fragili, inoltre, i ministri hanno adottato una serie di risoluzioni sui rifiuti di plastica marina e sulle microplastiche, compreso l'impegno di creare una piattaforma multi-stakeholder all'interno delle Nazioni Unite per intraprendere azioni immediate per l'eliminazione a lungo termine di rifiuti e microplastiche, esaminando l'intero ciclo di vita dei prodotti e aumentando l'efficienza delle risorse

L'Europa rappresenta una realtà geopolitica sensibile e attiva in materia di gestione sostenibile delle fasce costiere.

La Raccomandazione n. 2002/413/CE ICZM (Integrated Coastal Zone Management) relativa alla gestione integrata delle zone costiere definisce i principi, utilizzando un approccio multidisciplinare e sostenibile, alla base di una sana pianificazione e gestione delle zone costiere di cui gli Stati membri devono tenere conto nel formulare le rispettive strategie nazionali.

La consapevolezza che le pressioni sulle risorse marine sono spesso troppo elevate e l'esigenza di ridurre gli impatti ha indotto il Parlamento e il Consiglio dell'Unione Europea ad emanare la Direttiva quadro 2008/56/CE sulla strategia per l'ambiente marino (Marine Strategy Framework Directive - MSFD).

La Direttiva 2008/56/CE rappresenta il primo strumento legislativo dell'UE in materia di protezione della biodiversità marina. Sancisce all'interno di un quadro legislativo un approccio ecosistemico alla gestione delle attività umane che hanno un impatto sull'ambiente marino, integrando le nozioni di protezione dell'ambiente e di uso sostenibile. Tutti i dati raccolti dai monitoraggi nell'ambito della Strategia Marina confluiscono, secondo standard definiti, all'interno del Sistema Informativo Centralizzato, una banca dati accessibile a tutti i potenziali utilizzatori che consente la raccolta, la gestione e la condivisione a livello comunitario degli elementi acquisiti

La Decisione della Commissione 2010/477/UE ha fissato i criteri e gli standard metodologici relativi al buono stato ecologico delle acque marine da porre alla base di un rafforzamento della economia del mare.

La Blue Growth può essere un motore per il benessere e la prosperità dell'Europa: questo è stato il messaggio della strategia di crescita blu adottata dalla Commissione Europea nel 2012. Da questa tappa, la Commissione ha intrapreso una serie di iniziative per tradurla in azioni. In tale prospettiva la direttiva 2014/89/UE istituisce un quadro per la pianificazione dello spazio marittimo che deve presupporre il concetto di «Sistema Mare» quale organico governo delle istanze e delle esigenze, in un'ottica di sviluppo sostenibile, derivanti dalle molteplici attività umane che interessano gli spazi marini e del loro riverbero nelle relazioni tra i Paesi rivieraschi.

Attualmente, alcuni Paesi europei stanno perseguendo un approccio globale, attraverso azioni volte a ridurre l'impatto delle inondazioni sulla popolazione, sulle attività economiche, sul patrimonio culturale, sull'ambiente e sull'ecosistema. La Direttiva sulle alluvioni adottata dalla Commissione europea nel 2007 (2007/60/CE) incoraggia gli Stati membri a mappare il rischio di alluvione delle regioni fluviali e costiere, valutando l'esposizione delle persone e dei beni e adottando azioni per gestire e ridurre il rischio globale. In questo contesto, la legislazione italiana si occupa della protezione della vita umana, del patrimonio culturale, dell'economia e dell'ambiente, includendo il pericolo delle onde marine nell'elenco delle alluvioni (si veda il Decreto Legislativo 23 febbraio 2010, n. 49, "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvione").

Le dinamiche costiere sono determinate dall'interazione di diverse geosfere su un'ampia gamma di scale temporali. I principali fattori che innescano i cambiamenti nelle aree costiere sono geologici, geomorfologici, idrodinamici, biologici, climatici e antropici (**Labuz et al., 2015**). Le tempeste marine sono uno degli eventi estremi più comuni che colpiscono le aree costiere, caratterizzate da forti venti, onde e aumento del livello del mare (**Morton et al., 2011**). Le onde marine, causate dall'effetto del clima eolico locale, sono spesso sovrapposte alle onde di mareggiata che si muovono da largo verso la costa. L'interazione tra le onde di mare e di mareggiata può causare onde imprevedibilmente alte.

Le tempeste marine estreme sono particolarmente importanti, in quanto impattano violentemente sulla linea di costa e possono provocare danni ingenti alla popolazione e ai beni locali come conseguenza di un livello dell'acqua estremamente alto, di inondazioni e di processi erosivi (**Katoh e Yanagishima, 1988; De Zolt et al., 2006; Kortekaas e Dawson, 2007; Soomere et al., 2008; Switzer, 2008; Switzer e Jones, 2008; Lario et al., 2010; Rodríguez-Ramírez et al., 2015**). Questi eventi influenzano l'evoluzione morfologica della linea di riva determinando una serie di risposte morfodinamiche proporzionali all'energia della tempesta, con conseguenze significative sulla geomorfologia costiera e un generale aumento dei tassi di arretramento esistenti (**Morton e Sallenger, 2003**). Inoltre, l'evidenza empirica mostra un impatto significativo degli eventi estremi sugli insediamenti e sui territori costieri, con conseguenti danni economici, sociali e ambientali (**Mariano et al., 2021**). I loro effetti possono variare da lievi erosioni e sovrascorrimenti della linea di costa alla completa devastazione degli insediamenti costieri, minacciando le comunità costiere.

La conseguente variazione nella dinamica dei processi atmosferici può causare ulteriori modifiche nei modelli di vento e pressione vicino alla superficie, influenzando le tempeste, le condizioni di onda estreme e le inondazioni, portando a significative alterazioni dell'idrodinamica costiera (**Casas-Prat e Sierra, 2010; Labuz et al., 2015**). Weisse e von Storch (2010) hanno fornito una panoramica dello stato dell'arte sulla relazione tra cambiamenti climatici antropogenici e clima ondoso.

La rilevanza dell'argomento e la conseguente richiesta di nuovi paradigmi per la trasformazione sostenibile delle regioni costiere minacciate è riconosciuta anche nell'Agenda Globale per lo Sviluppo Sostenibile 2030, che raccomanda di rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili (Ob. 11) e sollecita i responsabili politici, le parti interessate e le autorità ad affrontare le conseguenze del cambiamento climatico (Ob. 13) (**Mariano et al., 2021**).

A breve termine, le mareggiate possono devastare le colture, le infrastrutture e togliere la vita a uomini e bestiame. A lungo termine, possono innescare significativi processi di erosione e la perdita di vaste aree di terreno (**Van Gelder et al., 2000**). La fluttuazione stagionale di questi eventi dipende dal numero e dall'intensità delle tempeste durante un determinato anno (**Dewall, 1979**) e dal contenuto energetico legato alle risposte morfodinamiche (**Edelman, 1972; Paladini de Mendoza et al., 2014**).

L'attuale contesto dei cambiamenti climatici introduce, dunque, questi elementi di aggravio dei rischi costieri, che si sovrappongono con il crescente problema dell'erosione dei litorali, anch'esso aggravato dall'intensità crescente delle mareggiate.

Il fenomeno dell'erosione costiera spesso minaccia l'incolumità delle comunità che si sono insediate lungo le coste, e pertanto la ricerca di sistemi di difesa è da

tempo una delle principali sfide dell'ingegneria marittima. Contestualmente, modelli di previsione dell'evoluzione della popolazione indicano un aumento demografico nelle aree costiere, e un maggiore interesse allo sviluppo della Blue Growth, con conseguente sfruttamento della fascia marino costiera.

Purtroppo, le metodologie di contrasto dei fenomeni erosivi spesso sono condizionate da eventi emergenziali, e non essendo frutto di una gestione pianificata producono soluzioni di intervento che a volte determinano l'unica vera forma di inquinamento del litorale, in forme di antropizzazione più o meno significative, che deturpano la naturalità del paesaggio.

Le soluzioni più sostenibili di interventi di protezione delle coste richiedono studi mirati per realizzare opere di difesa di tipo naturale o a basso impatto ambientale.

La difesa degli insediamenti urbani e delle attività economiche, in passato e fino a epoca recente, è stata spesso dettata da esigenze emergenziali e, comunque, con una preminente esigenza ingegneristica diretta all'esclusiva necessità di ridurre il rischio per la popolazione, trascurando la considerazione degli aspetti di sostenibilità e di tutela dell'ambiente (Mele H. B., 2019).

Nella contingenza della emergenza, tra le diverse soluzioni ingegneristiche di difesa dei litorali (Coelho C., 2020), hanno trovato ampia applicazione soluzioni di barriere con massi alla rinfusa poste direttamente sulla battigia (boulder barrier) e di muri a mare (seawalls) (U.S.A.C.E. 2003).

Le aree costiere e lagunari di tutto il mondo sono ecosistemi fragili, minacciati dall'innalzamento del livello del mare indotto dai cambiamenti climatici (Davies & Flather, 1977; Woth et alii, 2006; Lowe & Gregory, 2008; Kirwan et alii, 2010; Mel et alii, 2013), che potenziano i processi di inondazione ed erosione (Pranzini et alii, 2015; Bendoni et alii, 2016; Drejza et alii, 2019; Mel et alii, 2019; IPCC 2013). Questi rischi minacciano gli insediamenti urbani costieri, con particolare riferimento agli insediamenti sulla costa, causando danni significativi all'economia, all'ambiente e all'ecosistema (Lionello et alii, 2005; De Zolt et alii, 2006; Gedan et alii, 2009; Barbier et alii, 2011; Mel & Lionello, 2014; Mel & Lionello, 2016; Zarzuelo et alii, 2016; Tommasini et alii, 2019). Le aree costiere necessitano di strutture di difesa dal mare, che nei secoli passati sono state progettate a scala locale, concentrandosi solo sulla protezione dalle inondazioni.

La protezione delle coste è ampiamente trattata nella letteratura scientifica (Wiegel, 1964; Cortemiglia, 1981; CERC, 1984; Benassai, 1998; U.S. ACE, 2000; Zhang et alii, 2004; Pranzini et alii, 2015; Williams et alii, 2017), non coinvolgendo solo scienziati, ingegneri, legislatori e stakeholder, ma l'intera popolazione.

Inoltre, una stretta collaborazione tra le autorità è fondamentale per salvaguardare le esigenze ambientali, sociali ed economiche del territorio. Negli ultimi decenni, le azioni di protezione costiera realizzate in Italia sono state

principalmente legate al programma ministeriale nazionale, che si limitava a sostenere le esigenze locali senza promuovere un'azione di coordinamento globale, essendo ancora condizionato da vincoli finanziari. Poiché diversi interventi locali di difesa dal mare hanno alterato significativamente l'ambiente e potenziato il processo di erosione globale dell'area, è fondamentale progettare strutture di difesa dal mare efficaci, finalizzate alla protezione degli insediamenti urbani e al ripristino dell'ambiente.

Le iniziative delle Istituzioni hanno segnato nettamente la visione dell'ingegneria in cui inquadrare le azioni e gli interventi di difesa delle coste. In questa ottica si diffondono tipologie di opere di protezione dei litorali, con una considerazione più ampia di quello che è l'insieme di fattori e fenomeni ambientali che causano l'arretramento delle coste. Di fatto si prende consapevolezza di una serie di concause che hanno generato ed alimentano il problema, come l'alterazione dell'apporto sedimentologico fluviale, il dragaggio delle foci dei fiumi, l'alterazione del trasporto lungo costa a causa degli sbarramenti realizzati tramite pennelli trasversali. Questo approccio stimola l'ingegnerizzazione di opere come i ripascimenti protetti mediante la realizzazione di barriere sommerse, che conseguono un impatto "selettivo" ostacolando gli eventi estremi, e contemporaneamente consentono di ripristinare una parte della naturalità della fascia costiera (**Board, 1995**).

Di particolare sviluppo e, conseguente, interesse sono gli studi per definire lo stato del sistema marino costiero (**Luijendijk et al. 2018; Sutherland 2010**) la vulnerabilità della fasce costiere, anche attraverso la ricerca di indici sintetici (CVI) la cui formulazione consente una sintesi delle informazioni derivanti da un consistente numero di variabili accorpate in gruppi caratterizzati dall'aspetto geologico (geomorfologia; erosione/accrecimento del litorale; pendenza costiera; larghezza della spiaggia emersa e larghezza delle dune), dall'aspetto fisico (caratteristiche meteomarine, cambiamento del livello del mare per effetto delle modificazioni climatiche), dall'aspetto vegetazionale (caratteristiche della vegetazione dietro la spiaggia e presenza di posidonia oceanica al fondo) (**Sinay L., Carter R.W., 2020; Loinenak et al. 2015**).

Nonostante queste iniziative legislative e ingegneristiche inizino a produrre visibili effetti positivi, il fenomeno erosivo continua nella sua evoluzione negativa nel tempo, per diversi motivi, alcuni dei quali sono conseguenze della realizzazione di opere idrauliche marittime senza la considerazione del loro impatto sulla costa (**Cantasano et al. 2017**).

A livello globale, inoltre, il fenomeno dell'erosione costiera sta subendo un inasprimento ulteriore in funzione della complicazione dovuta all'innalzamento del livello medio del mare, ed è rafforzato dai cambiamenti climatici globali, che hanno reso più intensi i fenomeni estremi, rendendo in parte insufficienti le opere di difesa realizzate negli anni precedenti (**Antonioli et al. 2019**).

Inoltre, le opere realizzate hanno spesso rappresentato una evidente forma di inquinamento paesaggistico oltre che di forte alterazione degli ecosistemi marino costieri.

Infatti, risultano sufficientemente evidenziati gli impatti negativi indotti sul comparto biotico dalla realizzazione di opere di difesa costiera, in particolare delle barriere radenti e distaccate (**Dugan et al. 2011, 20 - Rizkalla e Savage, 2011**) mentre sono stati meno approfonditi gli effetti dei pennelli e delle opere trasversali (**Pattiaratchi et al. 2009**).

La realizzazione delle difese rigide comportano in genere cambiamenti e/o perdita di habitat, con conseguenti effetti non trascurabili sulla composizione delle comunità bentoniche (**Bulleri e Chapman 2010**). Infatti, la presenza di difese rigide crea nuovi substrati rocciosi, all'interno degli ambienti marini caratterizzati da substrato mobile (perché in erosione), che favoriscono l'insediamento e la successiva crescita di specie sessili, a volte invasive, prima assenti con conseguente alterazione dei meccanismi di interazione tra le specie, degli apporti larvali e della disponibilità di cibo per l'alterazione idrodinamica (**Walker et al., 2008**).

La realizzazione di barriere distaccate sommerse generano effetti ecologici non proprio positivi sui sedimenti e sull'infauna (presenza di fauna del lato verso terraferma dell'opera), soprattutto in presenza di strutture addizionali o dopo un ripascimento. L'intensità degli effetti dipende principalmente dalla composizione del popolamento bentonico originario. In generale, è stato osservato un aumento di biodiversità riconducibile sia all'insediamento di nuove specie sul fondo duro artificiale, sia alle variazioni dei popolamenti indotte dalle variazioni granulometriche del fondo in prossimità della struttura. Tali opere possono, inoltre, fungere da aree di nursery per la fauna ittica presente, con conseguente incremento del numero di specie di interesse commerciale (**Martin et al. 2005**).

Nonostante il ripascimento sia un'opzione di difesa costiera environmental friendly, sono stati rilevati effetti significativi su diversi componenti ambientali, quali comunità bentoniche, popolamenti ittici, fanerogame marine, artropodi terrestri e avifauna (**Speybroeck et al. 2006; 27 OSPAR 2009**).

Gli effetti del ripascimento sono legati alle caratteristiche del sedimento sversato (quali granulometria e mineralogia), da valutare in rapporto sia alle caratteristiche del sedimento originario, sia alle modalità tecnico-progettuali proprie dell'intervento (quali la quantità di materiale sversato, la tempistica e la stagione di intervento, nonché le tecnologie impiegate per il trasporto e per il refluento del sedimento) (**Speybroeck et al., 2006; Board 1995**).

Se le attività di ripascimento comportano modifiche rilevanti dal punto di vista della granulometria del substrato, sono state osservate importanti variazioni anche nella composizione degli organismi bentonici, con conseguente alterazione dell'ecologia della spiaggia (**Rakocinski et al. 1996**). Le variazioni temporanee di

abbondanza, diversità e composizione specifica della fauna intertidale, hanno durata variabile da poche settimane a pochi mesi (**Board, 1995**). Infatti, subito dopo il refluento del sedimento, che comporta il possibile defaunamento (totale o parziale) dell'area direttamente interessata, ha inizio il recupero dei popolamenti coinvolti, attraverso specifici meccanismi di reclutamento quali la migrazione di adulti e giovanili dalle aree adiacenti. La questione fondamentale nella valutazione degli effetti indotti dal ripascimento non è pertanto la perdita temporanea degli organismi presenti sulla spiaggia, peraltro attesa, quanto la velocità di recupero di queste comunità dopo il ripascimento.

Studi specifici sono stati condotti per valutare gli effetti del ripascimento sulle fanerogame marine, in particolare sulla *Posidonia oceanica* (**Ruiz et al. 1993; Ruiz e Romero, 2003**). Gli effetti attesi a breve termine sulle praterie di *P. oceanica* sono essenzialmente quelli legati all'aumento della torbidità dell'acqua. È noto che la diminuzione di luminosità generata dall'aumento di sedimenti fini in sospensione determina un calo nella produzione fogliare della prateria, cui potrebbe seguire, con il persistere dell'alterazione, la riduzione della densità e la regressione del suo limite inferiore (**Guidetti e Fabiano, 2000**). Un altro effetto che può essere indotto dal ripascimento sulle praterie di *P. oceanica* è quello legato ai fenomeni di ipersedimentazione (*oversedimentation*), per la maggior mobilità del sedimento appena deposto (**Manzanera et al. 1998**).

Per tali ragioni l'obiettivo della gestione integrata (ICM – Integrated Coastal Management) e sostenibile delle coste è ormai diffusamente percepito, e i contributi presenti in letteratura sono molteplici, anche nella direzione del superamento delle tecniche invasive di protezione delle coste prevedendo processi di riqualificazione e rinaturalizzazione degli arenili, stimolando studi e interventi multidisciplinari (**Maiolo et al. 2000, Seixas et al. 2019**) non trascurando il coinvolgimento attivo con le comunità locali (**Warnken et al. 2018**).

In ambito costiero coloro che sono demandati ad essere responsabili delle decisioni devono affrontare i problemi legati alla migrazione dalle aree interne verso le coste che vedono quindi una importante crescita della popolazione, dalla quale deriva la sempre maggiore pressione per lo sviluppo di aree turistiche e di sfruttamento del territorio, all'esaurimento degli stock ittici a causa del sovrasfruttamento delle risorse, e in alcuni casi anche alla mancanza di personale e di capacità finanziarie per gestire le risorse.

Il processo decisionale volto alla gestione delle zone costiere coinvolge più decisori e più discipline per essere in grado di comprendere e affrontare la complessità dei problemi che si presentano (**Sorensen e McCreary, 1990; Bijlsma et al., 1993; Bower et al., 1994; Cicin-Sain et al, 1998**).

Ai decisori che si occupano di management delle aree costiere è quindi richiesto di comprendere questioni che integrano diversi livelli di responsabilità.

Nell'ambito decisionale della gestione delle coste, i decisori devono essere in grado di ampliare la loro visione per comprendere e incorporare gli impatti delle loro scelte su altri gruppi di stakeholder e settori socioeconomici.

I vincoli dell'urgenza imposti dai compiti di gestione quotidiana spesso però non consentono di ottimizzare tali integrazioni, poiché magari è richiesto di intervenire in brevissimo tempo senza avere una possibilità concreta di conoscere le conseguenze implicite delle azioni intraprese.

Esiste quindi una difficoltà di coordinamento e gestione delle informazioni e delle azioni che richiede una disponibilità di un sistema informatico e di uno strumento di supporto alle decisioni, al fine di inquadrare correttamente i problemi e individuare le soluzioni sostenibili.

I sistemi di supporto alle decisioni (DSS) sono sviluppati con la prospettiva che questi sistemi siano in grado di migliorare la nostra comprensione delle relazioni tra gli elementi naturali e quelli socio-economici e quindi di migliorare il processo decisionale **(Te'eni e Ginzberg, 1991; Fabbri, 1998)**.

Un sistema di supporto alle decisioni deve conseguire la possibilità di migliorare la comprensione dei problemi e individuare decisioni con la consapevolezza degli effetti che tali decisioni possono produrre. Questa capacità è dipendente da diversi fattori come la capacità di analisi, la disponibilità di informazioni, la coscienza pubblica e politica dei problemi, la disponibilità di risorse finanziarie, il livello della capacità di analisi dei problemi, e la conoscenza di tutte le dipendenze che esistono fra i vari elementi che compongono un territorio.

Lo scopo di un DSS è quello di assistere la programmazione integrata del territorio rendendo comprensibili gli effetti di un'azione specifica rispetto ai diversi elementi che compongono il territorio, come ad esempio gli effetti che una difesa costiera può avere sugli aspetti biologici di un territorio o rispetto alla fruibilità turistica delle spiagge.

Questi problemi complessi sono difficili da comprendere pienamente da una singola disciplina ed è necessaria la combinazione di esperienze multidisciplinari al fine di valutare sia le alternative strategiche e contemporaneamente riuscire a produrre un'analisi precisa di tutte le conseguenze che possono derivare dagli interventi di gestione.

Per lo sviluppo di un DSS è importante conoscere il suo scopo ultimo, ad esempio lo si può produrre al fine di un monitoraggio territoriale per quantificare gli impatti ambientali dei singoli progetti, oppure può essere sviluppato con lo scopo di analizzare le alternative di gestione strategica del territorio. L'ulteriore elemento da identificare è comprendere se gli utilizzatori sono degli analisti e ricercatori, oppure se si tratta di operatori che deve definire azioni da realizzare concretamente sul territorio.

Un DSS-Costiero può essere definito come un sistema, anche parzialmente automatizzato, in grado di supportare e assistere il processo decisionale nell'ambito della gestione costiera. Sebbene il nome "sistema di supporto alle decisioni" suggerisca un sistema in grado di migliorare il processo decisionale, c'è il rischio che

un'applicazione errata di modelli e strumenti possa portare a risultati irrealistici e fuorvianti (Parker et al., 1995).

Gran parte di questo problema può essere superato attraverso un'attenta progettazione del sistema e assicurando che vengano fornite ai decisori le informazioni appropriate sul modello e sui suoi limiti, con controlli del sistema per evitare un uso improprio, ma è anche vero che quando i modelli diventano più complessi, i risultati non sono sempre valutabili più affidabili. La possibilità di produrre un DSS costiero è quindi molto complessa a causa di tutte le tematiche da tenere in considerazione.

Lo sviluppo di un modello onnicomprensivo potrebbe non essere la risposta alla complessità del problema affrontato. La completezza e la complessità non portano necessariamente a una maggiore accuratezza (Loucks, 1987). Tuttavia, Parker et al. (1995) mettono in guardia dall'assumere posizioni estreme sull'uso dei modelli, sottolineando che se da un lato essi non possono fornire tutte le risposte, dall'altro non sono una perdita di tempo ma un utile elemento di valutazione, poiché i risultati e le previsioni dei modelli dovrebbero essere accompagnati da un'indicazione del livello di affidabilità che si può riporre nel risultato, evitando che i risultati siano sottovalutati o sopravvalutati, o del tutto scontati.

Una soluzione può essere quella di introdurre, all'interno del sistema di analisi che fornirà successivamente le risposte, un elevato numero di variabili e di parametri da tenere in considerazione. Va considerato però che all'aumentare degli aspetti da tenere in considerazione contestualmente aumenta la difficoltà di uso e di previsione di uno scenario di proiezione futura che possa essere effettivamente ritenuto credibile (Figura 1-1).

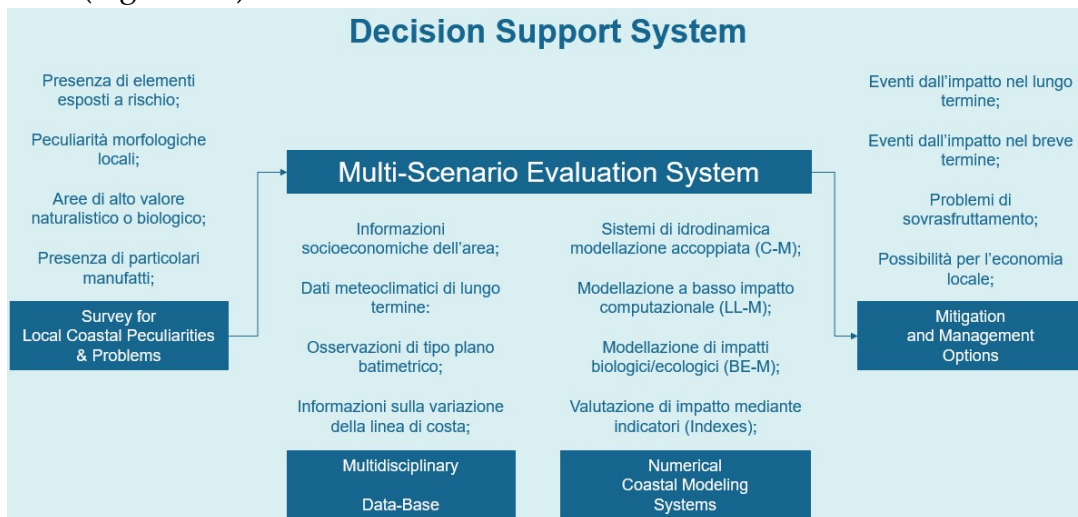


Figura 1-1 Esempio di DSS costiero che tiene conto di diversi elementi decisionali, all'aumentare delle variabili aumenta la complessità e decade il livello di affidabilità del sistema

Inoltre, è da tenere in considerazione che alcune informazioni non è detto siano effettivamente reperibili in un tempo utile ad effettuare una linea di programmazione, poiché in ambito costiero le campagne di misura e monitoraggio

in genere forniscono informazioni numericamente limitate a causa delle difficoltà legate all'ambiente e al costo.

Anche la rete di strumentazione di misura dei fenomeni che si verificano sulle coste risente della obsolescenza a cui sono sottoposte per gli sviluppi tecnologici che ne determinano diversi livelli di precisioni e rendendo le serie storiche di dati spesso non omogenee. Questo fa sì che molto spesso siano indisponibili informazioni adeguate anche per le sole valutazioni statistiche dei fenomeni ondosi e di vento. In questo scenario quindi, per quanto si possa pensare anche ad un ideale DSS di facile implementazione e sufficientemente articolato, spesso potrebbe risultare complesso ottenere l'input di dati necessari.

Difatti in letteratura gli esempi concreti non sono molti, e spesso non hanno raggiunto pienamente i requisiti che dovrebbe avere un DSS per aiutare realmente il processo decisionale in materia di gestione costiera.

Lo sviluppo di un DSS completo, flessibile, affidabile, utilizzabile e aggiornato potrebbe non essere fattibile. Le risorse finanziarie e il tempo necessario per raccogliere i dati richiesti e sviluppare il modello possono far sì che tali sistemi risultino sempre obsoleti.

Tuttavia, come già evidenziato precedentemente, il management costiero è un tema sempre più attuale e con una crescente importanza in tutti gli ambiti, da quelli socioeconomici a quelli ambientali e di resilienza degli ecosistemi, e i sistemi di ausilio alla gestione non dovrebbero essere trascurati.

Per questi motivi lo sviluppo di questo elaborato è iniziato dalla scelta su quale fra le varie tematiche di management focalizzare l'attenzione, al fine di poter specificatamente analizzare tutte le implicazioni derivanti da esso e dalle sue possibili soluzioni. È risultato, quindi, immediato individuare nelle forme di rischio direttamente provocate dai fenomeni ondosi la principale tematica da affrontare. Questo è dovuto al fatto che quelli legati all'erosione ed agli allagamenti da onde da mare sono da sempre i due principali problemi che affliggono le coste del territorio non solo calabrese. Nonostante esistano sicuramente altre tipologie di problemi nella gestione delle coste calabresi (lo sfruttamento della risorsa ittica, il funzionamento ed il controllo degli impianti di depurazione, l'impatto sugli ecosistemi del turismo balneare) quello della sicurezza dei beni e delle comunità esposte al rischio è un problema prioritario e storicamente grave.

Il rischio costiero non può trovare una soluzione differente se non nello sviluppo della capacità di individuare e mettere in pratica soluzioni di contrasto ai fenomeni che siano efficienti nella riduzione dei rischi e contemporaneamente non accentuino o inneschino altre tipologie di problematiche, come ad esempio l'eccessiva antropizzazione e la completa denaturalizzazione delle spiagge.

2. Dinamica Costiera e interventi di protezione

Quando si rende necessario intraprendere un'azione di contrasto al rischio di erosione costiera, con lo scopo di proteggere i beni esposti alle azioni del mare, le possibilità di intervento sono molteplici, bisogna individuare la soluzione ottimale in funzione di numerose variabili e considerazioni, tenendo conto dell'assetto territoriale e delle possibili modificazioni delle forzanti per effetto del cambiamento climatico, in un'ottica di corretta valutazione economica degli impatti, soprattutto in termini di sostenibilità.

A questo scopo nel 2004 è stato redatto il rapporto **EUROSION (2004)** all'interno del quale sono state individuate le linee guida di intervento sulla base degli studi e delle esperienze pregresse da parte dei vari Paesi della comunità Europea, che ancora oggi continua a rappresentare un avanzato punto di vista in questo campo e perviene a una schematizzazione efficace delle soluzioni concettuali a cui è possibile riferirsi nella pianificazione degli interventi di protezione di un tratto di costa soggetto a modifiche morfometriche in corrispondenza di insediamenti antropici.

In Figura 2.1 sono riassunte le schematizzazioni proposte (**Maiolo et al. 2020a**), definite come:

- opzione “*do nothing*”, in cui non si prevede nessun intervento di difesa, di gestione degli effetti dell'erosione sulla linea di riva e nell'immediato entro terra. Si tratta di una opzione sostenibile in realtà in cui non vi è interferenza significativa dell'erosione con elementi antropici o con aree naturali di particolare pregio o funzione;
- opzione “*managed realignment*”, in cui si prevedono interventi di riassetto del territorio comprendendo l'eventuale necessità di arretramento di infrastrutture e edifici determinando un arretramento della difesa recuperando spazio al naturale ingresso del mare nella costa;
- opzione “*hold the line*”, in cui si prevedono interventi, sul litorale e sull'entroterra, che mantengano o migliorino lo standard di protezione della attuale linea di difesa, con opere di manutenzione e di realizzazione di nuove opere di protezione e ripascimenti della spiaggia per il “mantenimento della linea di difesa”;
- opzione “*move seaward*”, in cui si prevedono nuove opere di difesa e ingenti ripascimenti e cordoni dunosi per garantire un “avanzamento della linea di difesa”;
- opzione “*limited intervention*”, si prevedono interventi limitati, non invasivi, assecondando i processi naturali nella riduzione dei rischi e permettendo le variazioni costiere, prevedendo, altresì, una serie di misure, dal rallentamento o arresto dell'erosione e dall'arretramento per la sicurezza delle persone degli elementi naturali o antropici esposti.

È necessario sottolineare che gli obiettivi sono necessariamente definiti per diversi orizzonti temporali tenendo conto che garantire la sicurezza dall'erosione e le inondazioni in occasione di una tempesta ha un tipico orizzonte temporale emergenziale, che evolve nell'arco di alcuni giorni, a cui corrispondono interventi con opere rigide, di contro l'erosione costiera conseguente all'innalzamento del livello del mare, dovuto al cambiamento climatico, ha un orizzonte temporale e una scala spaziale che ha valore nell'immediato, nel breve, nel medio e nel lungo periodo, rispetto al quale è possibile programmare interventi che evolvono nel tempo garantendo la sicurezza in emergenza e sviluppando opzioni con opere a basso impatto ambientale e di successivi interventi di rinaturalizzazione dell'ambiente costiero.

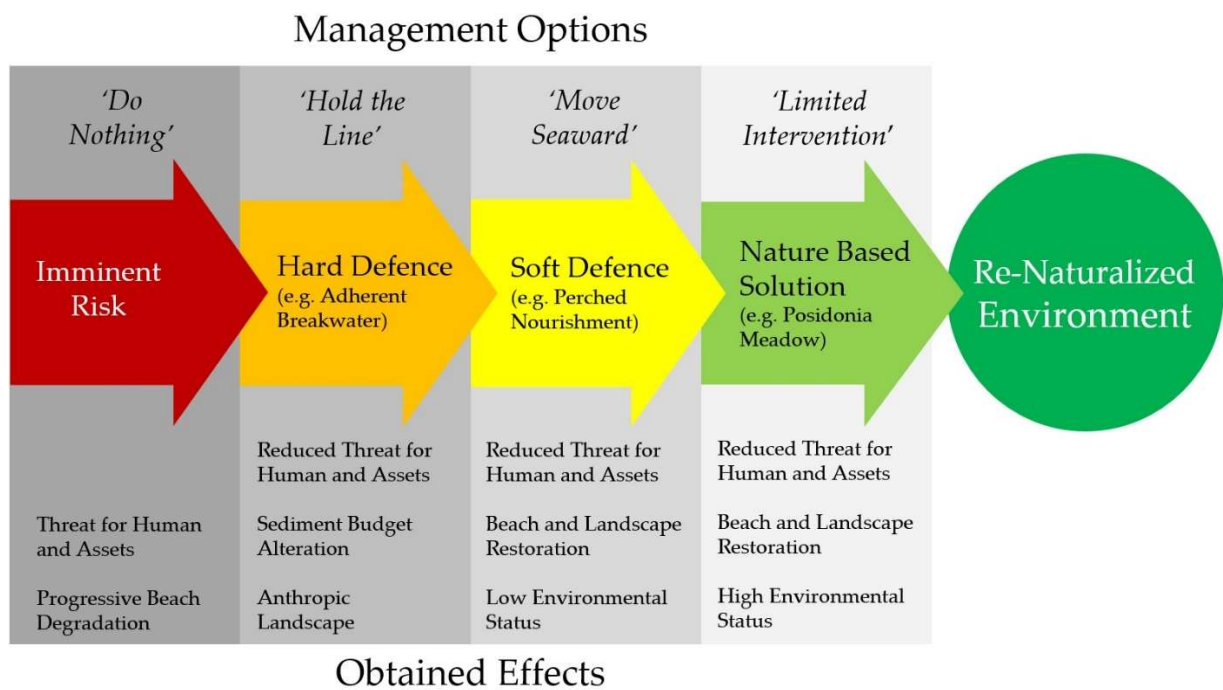


Figura 2-1 Le opzioni di management possibili nell'ambito della gestione costiera (da Maiolo et. al 2020)

Figura 2-2. Elenco delle tipologie di difese costiere e dei loro effetti. I puntini neri sono per gli effetti diretti, quelli bianchi per gli effetti indiretti. (Maiolo et al. 2020)

In emergenza la difesa delle abitazioni, delle attività economiche e delle infrastrutture si realizza mediante interventi possibili che comprendono barriere in massi (naturali o artificiali) gettati alla rinfusa sulla battigia disposti in modo da formare un incastro più o meno ordinato e muri realizzati a difesa degli interessi da proteggere (Figura 2-3).

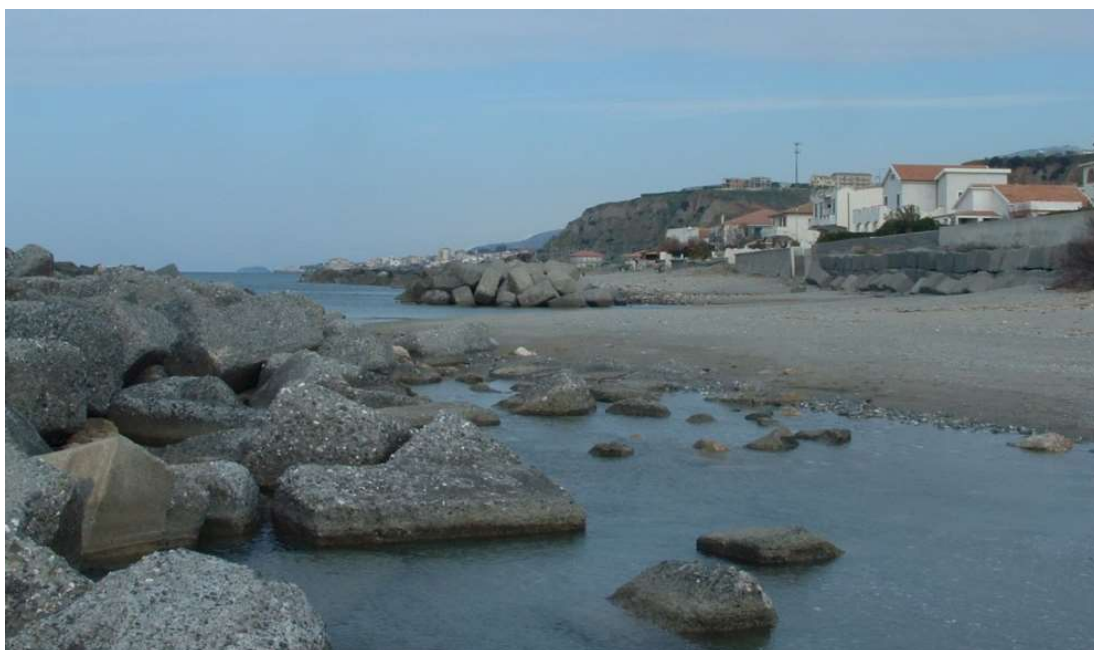


Figura 2-3. Esempio di difesa in emergenza, realizzata con barrier di massi in prossimità della linea di costa, ed un muro a mare a ridosso delle abitazioni. Da Maiolo et al. 2020a.

Le scogliere radenti sono strutture definite “flessibili”, perché consentono lo spostamento dei massi che le compongono senza pregiudicare la stabilità complessiva dell'opera, e “permeabili”, perché permettono alle onde incidenti di penetrare al loro interno e di dissipare gran parte dell'energia. Questo limita la riflessione delle onde, ma lo scalzamento al piede dell'opera è solamente rallentato. Le barriere a mare sono le più comuni opere di difesa individuabili lungo la linea di costa, poiché sono realizzabili in tempi brevi nelle località dove l'erosione minaccia le opere antropiche e diventa un problema da affrontare in tempi ristretti.

Lo scopo della barriera è quello di proteggere la costa e le opere antropiche poste in prossimità dall'azione erosiva delle onde e permettere solamente a quelle difratte di entrare all'interno della porzione di mare posta oltre la difesa. In genere queste barriere vengono realizzate in successione una di seguito all'altra inframezzate da varchi per garantire il ricambio di acqua e il passaggio di sedimenti.

La realizzazione di queste opere avviene attraverso l'utilizzo di massi naturali o artificiali, questi ultimi normalmente realizzati in calcestruzzo che può essere modellato più semplicemente a forma di un cubo oppure sfruttare forme più

complesse per migliorare la stabilità relativa e, quindi, la resistenza all'azione delle onde. La immediatezza degli interventi è usualmente determinata dalla disponibilità di tali strutture in piazzali di stoccaggio normalmente presenti lungo le coste che risentono frequentemente di tali emergenze. L'alternativa è quella dell'utilizzo di materiali inerti di piccola dimensione inseriti all'interno di gabbioni metallici collegati di unioni con cavi metallici. La stabilità rispetto al moto ondoso di questa ultima soluzione è data dalla corretta progettazione del peso complessivo della gabbionata, sebbene la soluzione dei cavi metallici in ambiente altamente erosivo impongono la previsione a medio termine di non poter contare su tale struttura di contenimento.

Affinché la barriera abbia un'efficacia nel contrasto all'erosione i massi devono essere correttamente posizionati, in maniera parallela alla costa, ma distaccati dalla linea di riva di una distanza tale da riuscire ad intercettare il trasporto di sedimenti sottocosta, e permettere quindi un accumulo di materiale nel tempo. Individuata questa distanza i massi vengono accumulati in maniera tale che la cresta della barriera affiori oltre il livello medio del mare, risultato quindi come un'opera a vista ed individuabile come elemento antropico del paesaggio.

Idraulicamente l'azione svolta è quella di impedire alle onde, soprattutto a quelle dotate di altezza maggiore della cresta della barriera, di raggiungere il tratto di costa oltre le difese. Questo avviene perché la barriera, composta di materiale non erodibile, diventa l'elemento contro cui le onde frangono e perdono la loro energia potenziale. Questa perdita di energia si trasforma in parte in energia cinetica e in parte viene riflessa nuovamente verso largo. A causa del frangimento che si viene a generare il fondale al piede della barriera viene scavato, e nel tempo la barriera necessita di manutenzione sul lato a mare.

Il principio di funzionamento di un muro a mare per contrastare l'erosione è quello di bloccare completamente l'azione delle onde e delle correnti sul tratto di spiaggia oltre il muro, in maniera tale che non possa essere alterato nel tempo.

La presenza di un materiale non erodibile, e di una superficie rigida e praticamente verticale dissipa una parte dell'azione delle onde, mentre una restante parte dell'energia viene riflessa nuovamente a largo. Oltre il muro non si risente di alcuna azione da parte del moto ondoso, e quindi i sedimenti protetti non possono essere mossi dall'azione delle correnti, impedendo di fatto il trasporto e la conseguente erosione.

Questo tipo di protezione è dunque un ostacolo totale e permanente contro qualunque azione da parte delle onde, siano essi eventi estremi che la semplice e quotidiana marea, facendo perdere, quindi, il contatto con l'ecosistema marino al tratto di spiaggia oltre il muro.

Le problematiche legate alla realizzazione di un dispositivo di protezione di questo tipo sono però molteplici, a iniziare da quelli economici. La realizzazione di

una opera di questo tipo, generalmente di grandi dimensioni ha un costo realizzativo alto, oltre ai successivi oneri di manutenzione che si protraggono nel tempo. L'azione delle onde sui muri a mare può essere anche particolarmente violenta, dovendo contrastare anche le mareggiate, e questo implica che senza l'adeguata cura l'opera potrebbe essere rapidamente danneggiata.

Trasversalmente al muro le onde che si frangono contro la difesa vengono riflesse e tornano verso largo. Ma essendo il punto di frangimento una zona di trasformazione dell'energia potenziale in energia cinetica al piede dell'opera si genera una azione di erosione che richiede quindi la progettazione e la realizzazione di un rinforzo. (Figure 2-4).

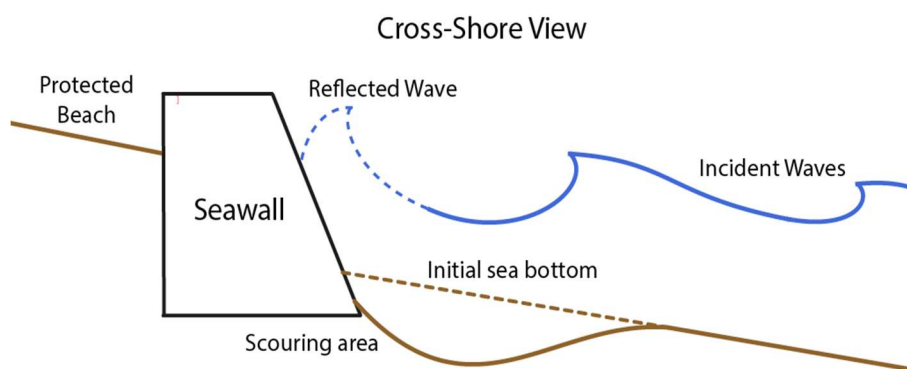


Figura 2-4. Esempio di muro a mare, con effetto di riflessione delle onde e Perdita di material al piede dell'opera. Da Maiolo et al. (2020a)

Aspetto da considerare, inoltre, è l'alterazione del regime sedimentologico locale, che può risultare particolarmente gravosa. L'effetto tipico dei muri a mare è quello di indurre nella parte terminale secondo la direzione di trasporto dei sedimenti una zona di forte erosione locale (Figura 2-5). Questo fenomeno è stato studiato per lungo tempo (**Yasso 1965; Silvester 1985; Maiolo et al. 2020a**), ed è tipicamente causato in natura dalla presenza lungo le spiagge dei promontori rocciosi. La presenza dei muri genera un effetto simile a scala locale, che provoca nel tempo l'arretramento della costa nelle aree limitrofe accentuando i fenomeni erosivi, e rendendo necessario l'inserimento di ulteriori opere di difesa per poter contrastare il fenomeno.

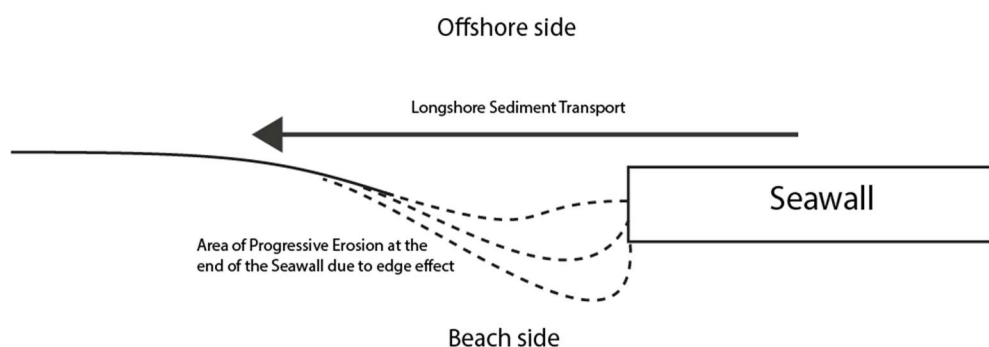


Figura 2-5 Esempio in vista dall'alto di muro a mare, con erosione a spirale progressive alla fine dell'opera. Da Maiolo et al. (2020a)

Analizzando quindi queste opere come un sistema di difesa realizzato allo scopo di gestire un'emergenza, l'azione di contrasto all'erosione mediante un muro a mare riesce nell'intento di salvaguardare il centro abitato dall'azione del moto ondoso, ma causa contemporaneamente una forte azione di erosione sui pochi metri di spiaggia rimasta (U.S.A.C.E, 2003; **Maiolo et al. 2020a**).

L'efficacia locale di questa tipologia di interventi è in genere assicurata nel medio-breve periodo, ma presenta un significativo impatto ambientale e paesaggistico: la perdita di naturalità del litorale, la formazione di specchi acquei con scarso ricambio, l'accentuazione dell'erosione verso i litorali sottoflutto rispetto al settore principale, la necessità di manutenzione periodica, soprattutto alle testate, che possono essere danneggiate da fenomeni di escavazione al piede, e dalla concentrazione delle azioni ondose, l'approfondimento dei fondali lato mare, per effetto della riflessione delle onde.

2.2. Interventi a basso impatto ambientale e di rinaturalizzazione delle difese degli arenili

La scelta delle opzioni di difesa costiere è, ovviamente, condizionata dalle caratteristiche idrodinamiche del paraggio e, mentre è sempre possibile riscontrare condizioni di successo, anche se parziale, delle opere rigide non sempre è possibile riscontrare la possibilità di intervenire con opere a basso impatto ambientale, con la prospettiva di un successo paragonabile a quello delle opere rigide.

Tuttavia, per la crescente sensibilità ai temi della sostenibilità ambientale, si registra la tendenza a ridonare naturalità alla costa e i sistemi di difesa rappresentati dai muri a mare sono andati via via diminuendo, anche in funzione del costo e dell'impatto ambientale e delle alterazioni paesaggistiche.

Risulta sempre più rafforzata la tendenza a ricorrere all'opzione "move seaward" "limited intervention", anche in fasi poste in successione tra loro.

Tecnicamente gli interventi più performanti in tale prospettiva sono quelli che tentano di riportare materiale alla spiaggia realizzando quindi dei ripascimenti rendendo stabile l'intervento proteggendolo.

L'impostazione concettuale e teorica è quella di riprodurre con materiale di riporto il profilo originariamente esistente fino ad una fissata profondità verso largo, conseguendo il "profilo di equilibrio della spiaggia" (Houston 1996; - Dean 1991; Maiolo et al. 2020a), che serve per la stima del volume di ripascimento e che necessita di essere stabilizzato e protetto con l'utilizzo di una barriera sommersa, usualmente composta da massi naturali (Figura 2-6).

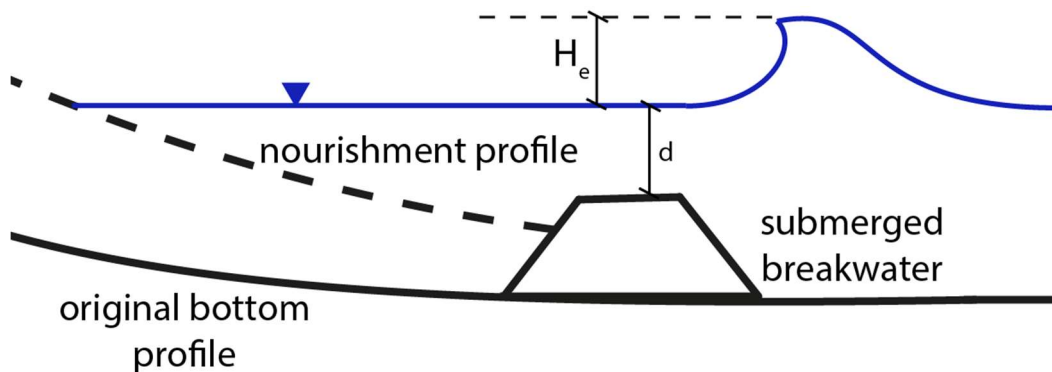


Figura 2-6. Esempio di configurazione per una barriera sommersa, Nella spiaggia protetta dalla barriera, la barriera stessa funge da zoccolo di contenimento al materiale del ripascimento. Da Maiolo et al. (2020a)

Secondo questo concetto l'andamento della spiaggia risponde alla forzante proveniente dalle onde con un adeguamento del profilo fino al raggiungimento di un nuovo equilibrio. Il profilo di equilibrio dipende quindi dal flusso di energia proveniente dalle onde e dalla dimensione dei sedimenti (Kriebel e Dean 1985), che

possono essere modificati rispettivamente con l'utilizzo della barriera sommersa e con l'adozione di una granulometria specifica.

L'efficacia di una barriera soffolta è legata alla capacità di intercettare una parte dell'energia del moto ondoso e di rifletterla nuovamente a largo. La restante parte di energia che riesce a raggiungere il ripascimento dietro alla barriera è quella che determinerà il nuovo profilo di equilibrio della spiaggia (**M. Gonzalez 1999**).

L'efficacia della barriera può essere determinata utilizzando differenti formulazioni, tutte, comunque, si basano sul rapporto tra la sommersenza della cresta (d) e l'altezza significativa dell'onda di progetto (H_e) (**M. Gonzalez 1999, Sorenses & Beil 1988**). Al diminuire del rapporto d/H_e la barriera assumerà sempre di più il funzionamento di una barriera emersa, riflettendo, quindi, verso largo una percentuale maggiore di energia.

Quello che si determina a tergo della barriera è quindi una zona che subisce una inferiore quantità di energia d'onda, in maniera simile a quello che si registra nel caso delle scogliere naturali. L'effettivo principio di funzionamento è differente, poiché nelle scogliere la diminuzione dell'energia d'onda avviene grazie al fenomeno di frangimento (wavebreaking), che non avviene sulle barriere sommerse a causa della larghezza trascurabile rispetto alla lunghezza d'onda (**Munoz-Perez et al 1999**). Inoltre, nel caso delle scogliere naturali, a causa delle tipiche forti irregolarità, si generano fenomeni di turbolenze che producono un ulteriore effetto di smorzamento da attrito, che è invece trascurabile nelle barriere artificiali dalla forma regolare.

L'introduzione di una barriera soffolta come difesa per la spiaggia non crea una ostruzione totale come nel caso dei muri a mare, e permette all'area oltre la difesa di avere interazioni con l'ecosistema originale, ripristinando quindi una parte della naturalità locale.

La corretta progettazione di una barriera soffolta rende efficace lo smorzamento dell'azione d'onda soltanto verso gli eventi caratterizzati da altezze d'onda maggiori di quelle di progetto (storm surge, extreme events), mentre lascia inalterato il clima ondoso degli eventi ordinari, rendendo minima l'azione di disturbo sulle correnti e sul trasporto di sedimenti della zona (**De Ruig et al. 1993**).

La ridotta interferenza di tali opere, più vicine alla concezione delle opere di ingegneria naturalistica, sull'ecosistema marino consente il conseguimento di un nuovo equilibrio molto prossimo a quello preesistente (**Spalding et al. 2014**). Alcuni studi recenti hanno confrontato l'efficacia nel contrasto all'erosione delle opere a basso impatto ambientale con quella offerta dalle difese rigide come i muri o le barriere, anche in riferimento al rispetto degli habitat costieri naturali (**Ferrario et al 2014; Narayan et al. 2016; Ondiviela et al. 2014**).

La evoluzione degli interventi a basso impatto ambientale, previsti dalla opzione "move seaward", verso "Nature Based Solutions", propri dell'opzione "limited

intervention”, è conseguita nel tempo e trova terreno favorevole sia in condizioni in cui questi ultimi interventi siano in grado di risolvere i problemi erosivi sia a valle di realizzazione di interventi rigidi o a basso impatto ambientale dopo la loro stabilizzazione della funzione di protezione (**Nesshover et al. 2017**).

Gli interventi “Nature Based Solutions” sono difficilmente classificabili in schemi rigidi in quanto, per definizione, tendono ad assecondare le evoluzioni naturali specifiche dei luoghi, offrendo una ricca molteplicità di varianti, pur riconoscendosi alcuni riferimenti di tipologie di base della categoria di interventi.

I riferimenti partono dalla realizzazione di quelle che vengono definite cobble-berms, cioè interventi di protezione locale realizzati per mezzo di ciottoli di pezzatura maggiore dei sedimenti locali. La presenza di materiale di pezzatura maggiore direttamente esposto all’azione delle onde protegge i sedimenti locali sottostanti. L’efficacia di questa tipologia di azioni viene però vanificata dalle mareggiate, poiché gli elementi usati per il rivestimento sono soggetti comunque all’azione delle onde.



Figure 2-7. Esempio di tecnica cobble-berm, cioè rivestimento in ciottoli, posto a protezione di una spiaggia di sabbia.

La realizzazione di dune riproduce i sistemi complessi presenti in natura nella conformazione di una spiaggia, soggetti all’azione del vento, delle onde, e protetti dalla presenza di vegetazione sulla spiaggia. Entrambi gli agenti atmosferici svolgono un’azione duplice, sia di accrescimento che di erosione, in funzione della tipologia di evento climatico che subisce la costa, generando un temporaneo fenomeno di accumulo o di perdita di materiale da parte del sistema di dune.

La forte domanda di edificazione della fascia costiera ha alimentato una maggiore richiesta di spazio a ridosso della linea di riva determinando la rimozione di alcune dune. La realizzazione di dune artificiali può, quindi, rappresentare una forma di contrasto all’erosione riposizionando della sabbia non solo per allontanare

la linea di riva come avviene con il ripascimento, ma con l'intento di ricostruire l'accumulo necessario al ripristino e riequilibrio del meccanismo di azioni svolte dal vento e dalle onde (Dare 2003; Masselink 2019).

Altra tipologia base è quella della piantumazione di specie arboree e arbustive sulla spiaggia, anche, a consolidamento dell'azione ristabilita dalle dune artificiali; infatti tali specie hanno capacità di trattenere i sedimenti sia grazie alla presenza degli apparati radicali, sia attraverso il meccanismo di dissipazione offerto dalla presenza delle foglie, che aumentando la scabrezza idraulica riducono la progressione delle onde verso l'entroterra. Tali interventi possono risultare complessi e sicuramente non di impatto a breve termine, poiché la procedura di piantumazione, l'effettivo attecchimento e il definitivo affrancamento possono richiedere tempi lunghi.

Una ulteriore possibilità di utilizzazione della vegetazione autoctona negli interventi di difesa è data dal consolidare la eventuale presenza di vegetazione nella fascia marina oltre la linea di costa. Questo approccio consiste nel ricreare il substrato naturale sul quale l'ecosistema locale si era sviluppato, cercando di ripristinare le condizioni necessarie alla diversità ed alla complessità dell'ecosistema. Avere un sistema vegetale e artificiale complesso tra la costa ed il mare fa sì che le onde provenienti da largo debbano attraversare elementi che ne contrastano l'avanzamento. La presenza di questi elementi dissipa l'energia potenziale delle onde, e limita conseguentemente il quantitativo energetico che causa l'erosione.

In funzione di quelle che sono le caratteristiche naturali del luogo da difendere, gli interventi da realizzare possono essere anche molto differenti, con procedure ed esiti che dipendono dalle particolarità degli habitat locali [Tabella 2-1] (Narayan et al. 2016), del tutto comparabili con quelli relativi agli studi effettuati sulle barriere (Ferrario et al. 2014).

Tabella 2-1 Percentuale di attenuazione delle onde per ogni habitat costiero. Da Maiolo et al. (2020)

Habitat	Wave height reduction
Coral Reefs	70%
Salt-Marshes	72%
Seagrass Meadows	36%
Mangroves	31%

L'efficacia in termini di attenuazione delle onde può essere, quindi, molto alta in relazione al tipo di ambiente ma, in generale, la presenza di un sistema complesso e naturalizzato permette non soltanto l'attenuazione dell'energia del moto ondoso,

e anche di catturare i sedimenti e di accumulare sostanze che alimentano ulteriormente il substrato.

Il principale punto di forza di un sistema di difesa realizzato attraverso interventi “Nature Based Solutions” è quello di conseguire l’obiettivo dell’opzione “limited intervention”, valorizzando la resilienza dell’ambiente marino costiero, potendo contare su una fase iniziale gestita attraverso un’azione antropica, ma successivamente l’ecosistema che si viene a creare è in grado di rinnovarsi autonomamente, con il proliferare di nuovi elementi biologici (Figura 2-8).

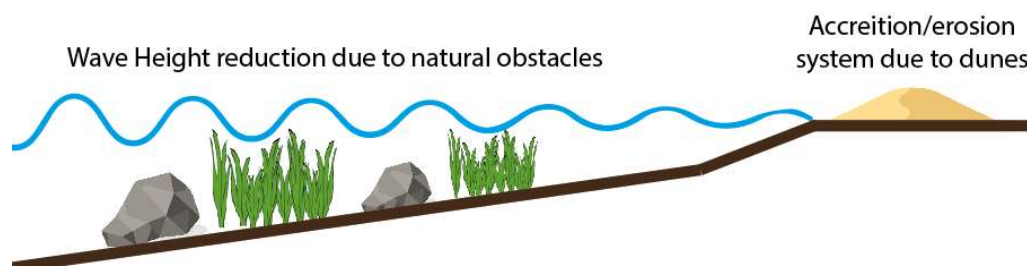


Figura 2-8. Esempio dell’interazione tra elementi naturali di una spiaggia ed il treno d’onde proveniente da largo. Da Maiolo et al. 2020a.

In tale prospettiva di particolare interesse risulta la presenza della *Posidonia oceanica*, pianta acquatica presente in tutto il Mediterraneo (**Boudouresque et al. 2016**), e le sue praterie coprono circa il 2% di tutto il fondo del mare (**Gobert et al. 2006**). Si tratta di una specie che vive a lungo e che cresce molto lentamente, permettendo al suo insediamento nella forma di vere praterie di durare per secoli. Si tratta di una specie che risente poco dei cambiamenti stagionali (**Ondiviela et al. 2014**) e che può crescere indistintamente su terreni sabbiosi o su substrati rocciosi. Il forte e fitto apparato radicale incide molto sul substrato del fondale marino, poiché è in grado di intrappolare i sedimenti in sospensione (**Cantasano 2014**).

Il contributo al contrasto dell’erosione avviene attraverso un processo che comprende la riduzione dell’azione d’onda attraverso il passaggio sulla prateria, la formazione dei banquettes fogliari sulla spiaggia, la stabilizzazione dei sedimenti attraverso l’intrappolamento all’interno del substrato definito *matte* (**Campagne et al. 2015**).

L’influenza sull’azione idrodinamica delle onde (**Asano et al. 1988; Anderson & Smith 2014**), dipende dalla geometria delle piante e dal campo di moto, quantificando l’impatto in termini di resistenza idrodinamica e di trasporto dei sedimenti (**De Falco et al. 2003; Corenblit et al. 2007**).

La pianta al fondo svolge un duplice effetto idrodinamico, offrendo con l’apparato fogliare frizione al flusso imposto dalle correnti (**Boccalaro et al. 2008**), e generando con le oscillazioni dello stesso una azione di dissipazione dell’energia d’onda (**Ondiviela et al 2014**). Quando la pianta muore invece l’azione di contrasto all’erosione è dovuta in parte alla formazione dei *banquettes* sulle spiagge (Figura 2-9.a), che consistono in stratificazioni di foglie distaccate che si accumulano sui

litorali, contrastando il trasporto dei sedimenti (**Boudouresque e Meinesz 1982**). L'altra azione dovuta alla pianta morta è data dall'apparato radicale che rimane al fondo, andando a generare il *matte* (Figura 2-9.b), cioè il substrato di materiale organico che mantiene i sedimenti al fondo e funge da nutriente per le piante vive (**Boccalaro 2012**).



(a)



(b)

Figure 2-9. Posidonia oceanica: (a) banquettes su una spiaggia di sabbia; (b) substrato di matte con in vista i rizomi delle piante. Da [Maiolo et al. 2020a](#).

La presenza di *Posidonia oceanica*, inoltre, contribuisce in modo significativo all'azione autodepurativa rispetto all'inquinamento delle acque del mare (**Costanza et al 1997, Campagne et al. 2015**), allo stoccaggio del carbonio con capacità di 70 volte maggiore, a parità di superficie, della foresta tropicale (**Campagne et al. 2015**) e con la significativa produzione di ossigeno favorisce la proliferazione degli elementi biologici dell'ecosistema ittico.

Infine, non è da sottovalutare la comparazione economica tra le diverse opzioni (**EUROSION, 2014**) che sicuramente risentono delle condizioni locali di reperimento dei materiali e mezzi ma è possibile registrare che la comparazione dei costi di realizzazione tra opere basate su approcci "Nature Based Solutions" e barriere artificiali mostri che le "salt-marshes" e le piantagioni di mangrovie possono essere da due a cinque volte più economiche di una barriera di massi sommersa, risultando quindi come alternative realmente percorribile e conveniente anche sotto questo aspetto (**Narayan et al. 2016**).

3. Individuazione del caso di studio: la spiaggia di Calabaia di Bevedere Marittimo sulla costa tirrenica cosentina.

Al fine di sperimentare e verificare un percorso di indagine e analisi più significativo e anche rappresentativo delle azioni di management e dei relativi effetti, si è individuato un sito, rappresentato da un'area circoscritta, sul quale fosse possibile reperire materiale bibliografico, e contemporaneamente effettuare delle indagini in situ, tale da poter rappresentare attualmente un significativo caso di studio anche utilizzabile in studi e ricerche future.

La costa tirrenica cosentina rappresenta una realtà importante sia in termini di popolazioni residente e turistica sia per la presenza di attività economiche, e contemporaneamente è soggetta storicamente a importanti fenomeni di erosione costiera, in parte documentati.

Analizzando i documenti disponibili è in particolare emerso un sito, quello di Calabaia di Belvedere Marittimo (CS) sul quale, nella fase di ricerca bibliografica generale del territorio, si è individuata una discreta quantità di informazioni, di dati, opere ingegneristiche e studi rilevanti dal punto di vista del management costiero.

In particolare, sono stati ritrovati due documenti, entrambi redatti dal prof. Mario Bossolasco, già professore presso l'università di Pisa, e al tempo membro del CNR.

Il primo documento è una pubblicazione del 1939, nella quale viene evidenziato il fenomeno dell'erosione costiera a Belvedere Marittimo (**Bossolasco, 1939**), attraverso fotografie (in Figura 3-1a), immediatamente confrontabile con la vista aerea moderna dell'area (in Figura 3-1b).

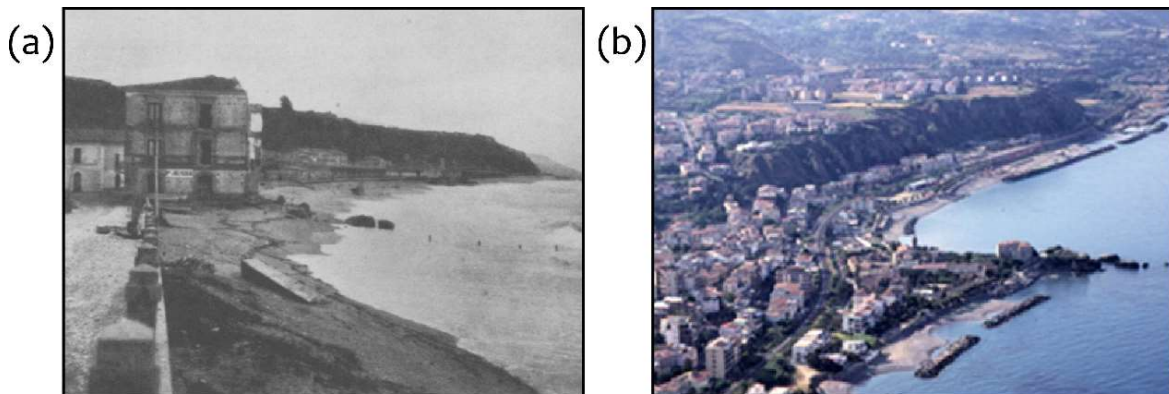


Figura. 3-1 Belvedere Marittimo. (a) panoramica della spiaggia (Bossolasco, 1939); (b) la forte urbanizzazione ha causato l'isolamento del terrazzo pleistocenico dalla costa e nasce la necessità di proteggere la linea di riva. L'immagine evidenzia il diverso processo di erosione con e senza le barriere a mare. *(Da Maiolo et al. 2020b)*

In questa prima nota è anche riportata una immagine di confronto (Figura 3-2) fra la linea di costa del 1913 secondo i dati catastali e quella del 1938, rilevata a seguito del crollo in mare di parte di un edificio, che 25 anni prima non si trovava a ridosso della costa.

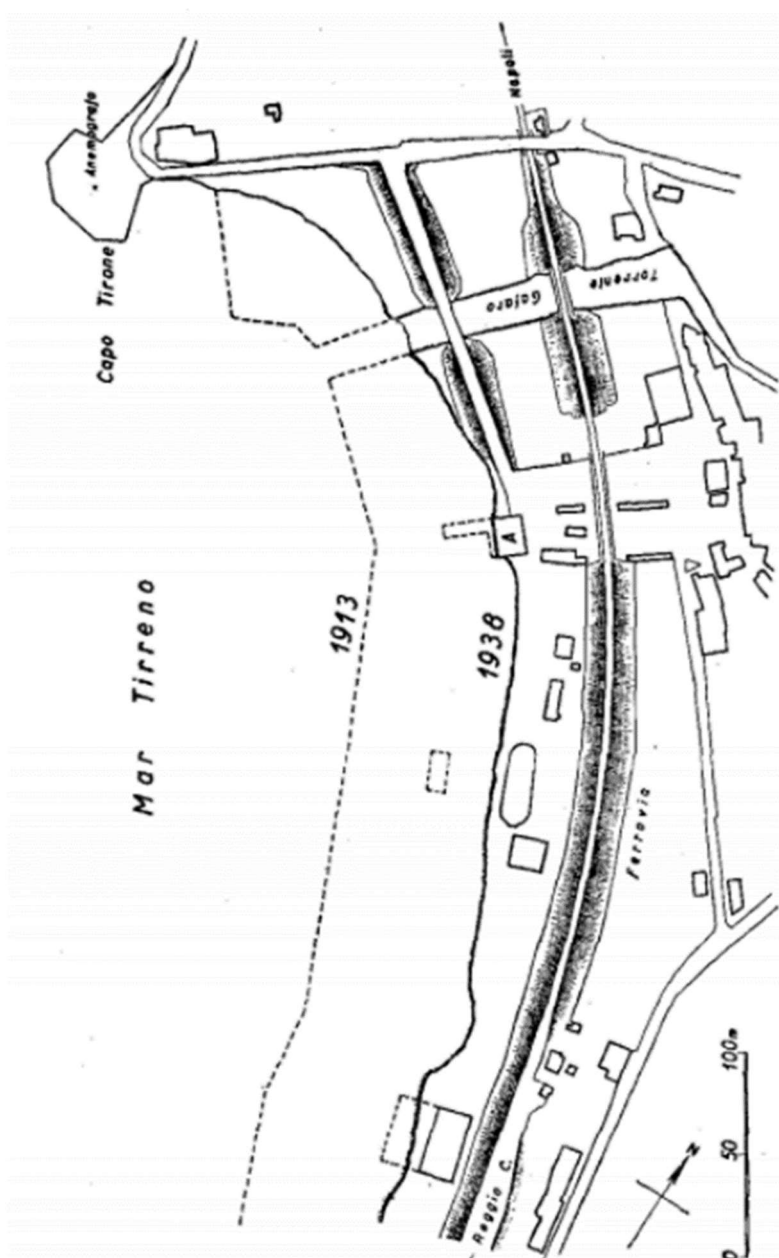


Figura. 3-2 Belvedere Marittimo. Confronto tra le linee di riva all'altezza del promontorio di Capo Tirone. (Bossolasco, 1939); L'immagine evidenzia la significativa perdita di materiale ed il crollo di una parte dell'edificio fotografato in 3-1a;

Lo stesso Bossolasco negli anni seguenti riporta una seconda nota del 1957 relativa alle brezze di mare ed alle analisi di vento su alcune località costiere, fra cui nuovamente Belvedere Marittimo, documentando poco meno di un anno di osservazioni anemometriche sul promontorio di Capo Tirone, a valle delle quali si riteneva opportuna l'installazione di un anemometro permanente in questa località (Bossolasco, 1952).

In questa realtà di diffuso ed evidente fenomeno erosivo, attenzionato ormai da circa 40 anni, le abitazioni locali presenti sulla costa diventano anno dopo anno sempre più minacciate, rendendo necessari interventi emergenziali di protezione.

Gli interventi hanno riguardato la realizzazione di muri a mare e di una serie di barriere radenti, realizzate mediante l'utilizzo di blocchi di calcestruzzo cubici posati alla rinfusa a pochi metri dalla linea di riva (in Figura 3-3 un esempio di massi posti a difesa del litorale di Belvedere).



Figura 3-3. Una parte della spiaggia SUD di Belvedere nel 2002 (da Maiolo et al. 2020)

Il sistema di difesa, che si è definito a seguito degli interventi emergenziali, ha di fatto modificato il paesaggio determinando una forma permanente di inquinamento ambientale per come si evidenzia nella Figura 3-4.



Figura 3-4. La linea di costa di Belvedere Marittimo nel 2022. In fucsia i limiti comunali, in arancione le barriere di massi distaccate; in rosso le barriere radenti; in azzurro il porto, in giallo la barriera sottomarina di Calabaia. (Da Maiolo et al. 2020b)

Queste opere hanno quindi portato ad un completo corazzamento dell'area costiera (Figura 3-5 a,b,c,d; Figura 3-6, Figura 3-7), rendendolo di fatto un paesaggio privo di alcun valore ambientale, e lasciando dei luoghi con un aspetto poco attrattivo dal punto di vista turistico, nonostante il valore potenziale dell'area (Figura 3-5 e,f,g,h).

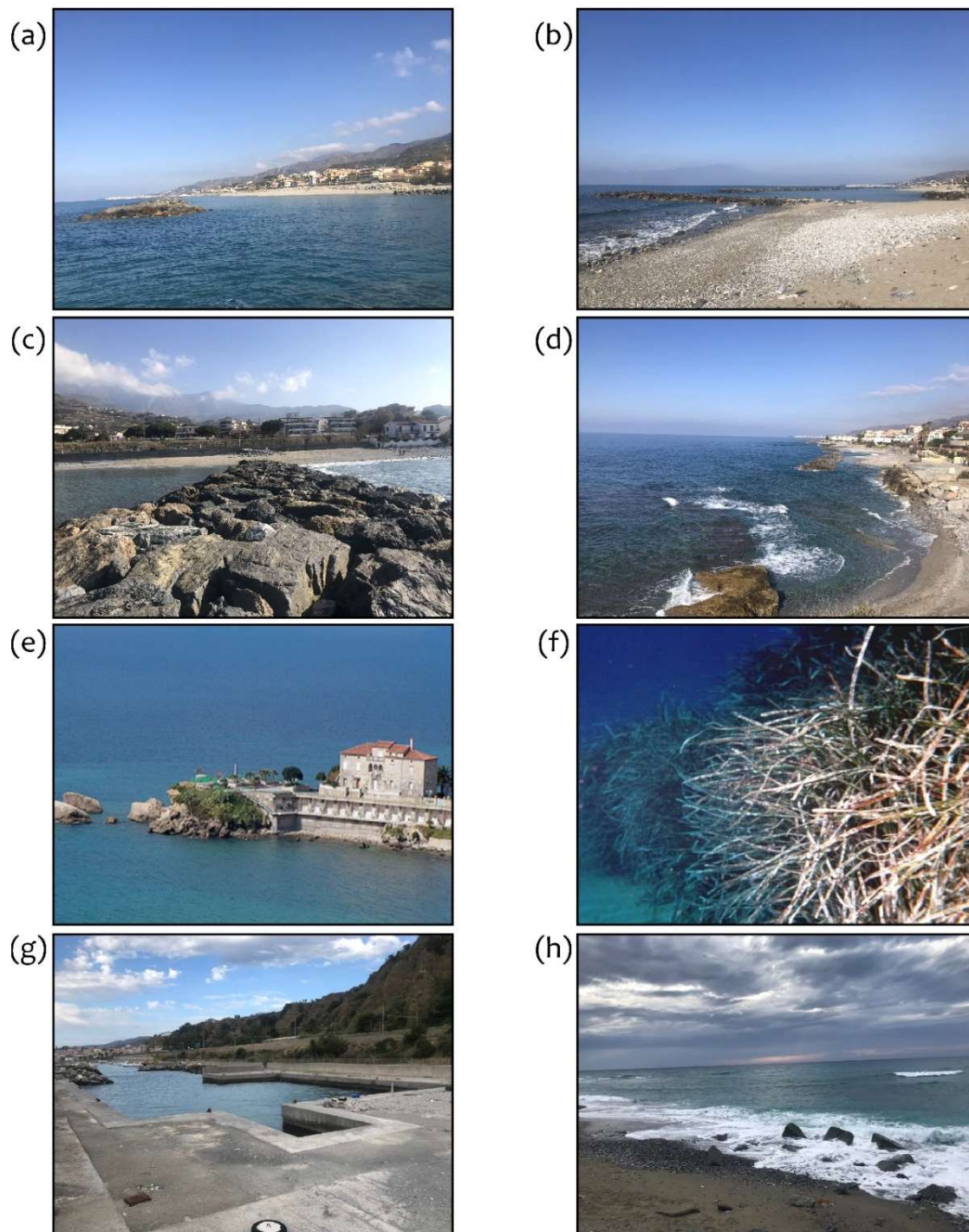


Figura 3-5 - Area di studio della costa di Belvedere Marittimo. In (a) e (b) i frangiflutti longitudinali posti perpendicolarmente alla linea di riva, a protezione della ferrovia tra Belvedere Marittimo e Diamante. In (c) e (d) la vista a nord e a sud della difesa costiera in località "Scogli Oremus", a Nord di Capo Tirone. In (e) "Palazzo De Novellis" situato a Capo Tirone, utilizzato a supporto delle attività di divulgazione della Stazione Sperimentale Marina di Capo Tirone. In (f) mostra la vegetazione di *Posidonia oceanica* dell'area SIC di Capo Tirone. Il pannello (g) rappresenta il porto di Belvedere Marittimo e il pannello (h) la linea di costa situata a sud del porto. **(Da Maiolo et al. 2020b)**

Fra le molte opere presenti sulla linea di costa si evidenzia la presenza di una barriera soffolta (Figura 3-6), a difesa di un ripascimento in località Calabaia, a sud del porto di Belvedere Marittimo.



Figura 3-6 – Spiaggia di Calabaia nel 2022, a sud della costa di Belvedere Marittimo. In giallo è evidenziata la presenza della barriera soffolta. (Da Maiolo et al. 2020b)

Questa opera è stata realizzata all’inizio degli anni 2000, con lo scopo di ripristinare la spiaggia, e di allontanare la linea di costa dagli edifici. Ancora oggi presenta un litorale praticamente integro, utilizzabile dalla popolazione, ed a protezione dall’erosione e dagli allagamenti costieri.

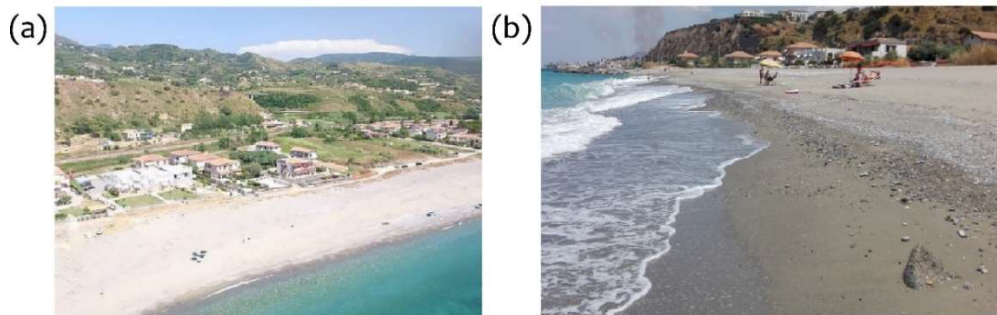


Figura 3-7 – Spiaggia di Calabaia nel 2022, a sud della costa di Belvedere Marittimo. In (a) e (b) l’attuale spiaggia, si evidenzia la linea di costa distante dalle case e la presenza di materiale sottile sulla riva. (Da Maiolo et al. 2020b)

Sull’area interessata sono stati realizzati, sempre con il coordinamento del USACE –CHL (U.S.A.C.E.-C.H.L., 2000, Maiolo et al. 2000a, Maiolo et al 2020b): lo studio del clima ondoso a largo e di propagazione da largo verso riva, un inquadramento geologico e geomorfologico, la caratterizzazione geotecnica del terreno di sedime dei frangiflutti, i rilievi topografici, batimetrici ed analisi sedimentologica, la verifica con modello “a una linea” dell’intervento, lo studio di valutazione d’impatto ambientale e lo studio idrologico-idraulico dei Fiumi Lao e Abatemarco al fine di consentire i prelievi dei materiali in cava.

La contemporanea presenza di informazioni tecniche, di un percorso tecnico e amministrativo atto al ripristino del litorale, di diverse tipologie di opere e di dati provenienti da studi pregressi ha reso Belvedere Marittimo, e nello specifico il sito di Calabaia, il caso studio da analizzare, e sul quale si è deciso di svolgere ulteriori indagini, proposte nel paragrafo seguente.

3.1 L'area tirrenica meridionale della provincia di Cosenza

La regione Calabria si trova nel sud dell'Italia. La regione è definita da più di 780 km di coste densamente popolate, in parte situate nel Mar Ionio e in parte nel Mar Tirreno (Figura 3-8). Le aree costiere sono di fondamentale importanza per l'economia della regione, che si basa principalmente sulla pesca, sul turismo e sulle attività ricreative. Tuttavia, la costa tirrenica meridionale è significativamente interessata da processi di erosione che causano l'arretramento della linea di riva, minacciando il patrimonio costiero (Foti et alii, 2019).



Figura 3-8 - La Regione Calabria e i comuni appartenenti alla fascia costiera tirrenica della provincia di Cosenza (Da Maiolo et al. 2020c).

La costa tirrenica appartenente alla Provincia di Cosenza è lunga circa 110 km e comprende 21 comuni (Tortora, Praia a Mare, San Nicola Arcella, Scalea, Santa Maria del Cedro, Maierà, Buonvicino, Diamante, Belvedere Marittimo, Sangineto, Bonifati, Cetraro, Guardia Piemontese, Fuscaldo, Paola, San Lucido, Falconara Albanese, Fiumefreddo Bruzio, Longobardi, Belmonte Calabro, Amantea, v. Fig. 3-8). L'intero litorale ha un forte potenziale turistico, dal momento che la popolazione residente è di 117.500 abitanti, mentre la popolazione fluttuante è di quasi 420.000 abitanti (ISTAT, 2020).

3.1.1 Inquadramento morfologico e geografico

Per quanto riguarda l'evoluzione geologica dell'area mediterranea occidentale, durante il Cenozoico è stata principalmente legata allo scivolamento della placca adriatico-ionica al di sotto della placca euro-asiatica (De Ritis et alii, 2019).

Nel Mar Tirreno meridionale, vicino al bordo della placca adriatico-ionica, la subduzione ha prodotto una risalita di magma e la costruzione di una catena vulcanica. La catena vulcanica può essere classificata in un'area occidentale, situata lontano dalla costa, dove gli edifici vulcanici mostrano una morfologia irregolare modellata dal movimento tettonico, e un'area orientale, situata vicino alla costa, che mostra edifici vulcanici arrotondati con una sommità piatta, a causa dell'interazione tra l'attività vulcanica e le variazioni del livello del mare che hanno prodotto molteplici cicli di erosione e sedimentazione.

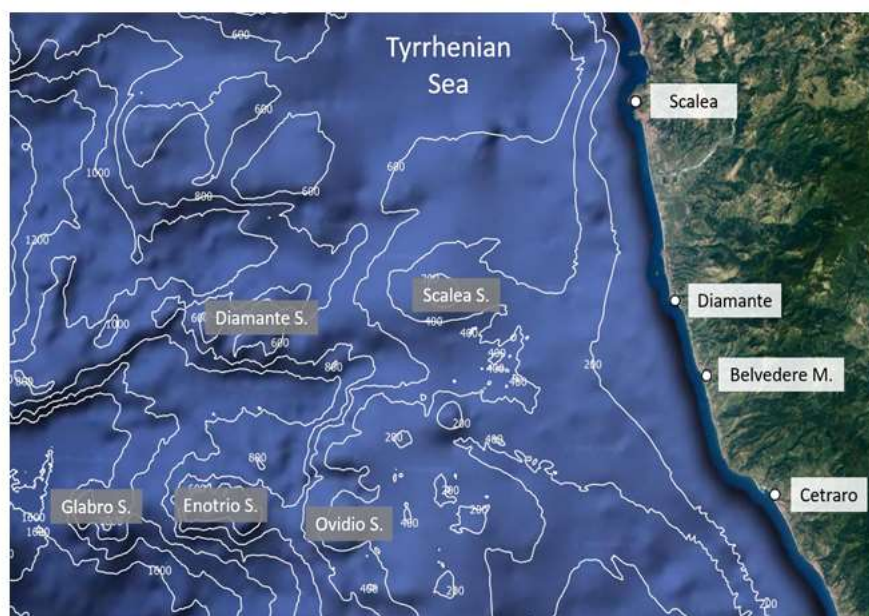


Figura 3-9 - Batimetria del Mar Tirreno tra Scalea e Cetraro. I complessi vulcanici di Scalea, Glabro, Diamante, Enotrio e Ovidio sono evidenziati. (Da Maiolo et al. 2020c)

De Ritis et alii, (2019), hanno individuato, a 15 km a ovest dalla costa calabrese, tra Scalea e Guardia Piemontese, una delle più grandi strutture vulcaniche sottomarine italiane, originata dalla fusione del materiale proveniente dal mantello terrestre e, in particolare, da una profonda frattura della crosta (Fig. 3-10).

La placca calabrese è uno dei frammenti appartenenti alla piattaforma continentale del Mediterraneo occidentale, che si è separata dal margine meridionale della placca europea ed è entrata in collisione con la piattaforma africana (Cortese, 1895; Argnani & Trincardi, 1993; Critelli & Le Pera, 1998).

La costa tirrenica della regione Calabria è caratterizzata da quattro zone geologiche (Barone et alii, 1982, vedi Fig. 3-10):

- la Catena Costiera (cioè il Coastal Range), caratterizzata da una catena molto alta di rocce metamorfiche primarie;
- la stretta pianura costiera, interrotta da rilievi si estendevano fino al mare;
- la stretta scogliera continentale;
- il bacino di Paola, lungo 70 km e caratterizzato da una profondità massima di 1 km.

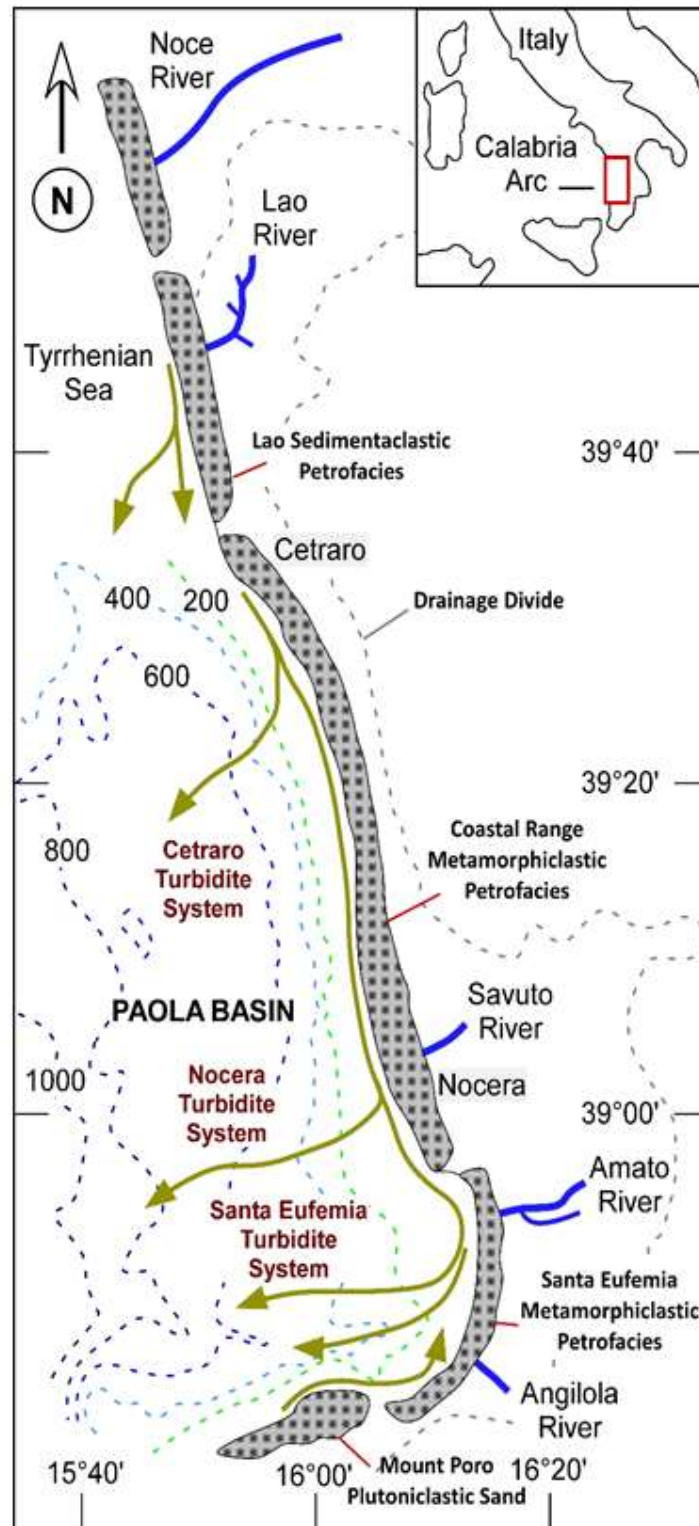


Figura 3-10 - Struttura geologica dell'area costiera della Provincia di Cosenza. (Da Maiolo et al. 2020c)

Fino al XIX secolo, la costa calabrese era utilizzata principalmente per scopi agricoli. Il litorale era scarsamente popolato e l'apporto di sedimenti non era significativamente influenzato dalle attività umane. La costruzione della ferrovia Reggio Calabria-Napoli ha causato tre cambiamenti permanenti nella geomorfologia costiera:

- *l'interruzione dell'apporto di sedimenti alla linea di costa, che ha colpito le dune oloceniche e innescato un processo di erosione globale nell'area;*
- *interruzione del convogliamento del materiale detritico colluviale dai terrazzi alluvionali del Pleistocene al mare;*
- *stabilizzare una posizione permanente della linea di costa, che ormai non può più essere modellata dagli eventi climatici.*

La costa della Provincia di Cosenza (**AAVV, 2004**) è circondata da altipiani che raggiungono il mare con ampie pendenze. L'orografia dell'area è delineata a nord dal massiccio del Pollino, che si estende sul versante sud-occidentale della Valle del Noce e su quello orientale della Valle del Lao, fino ai comuni di Tortora e Belvedere Marittimo attraverso il Passo dello Scalone (744 m s.l.m.).

A sud di Belvedere Marittimo, la Catena Costiera è la dorsale del sistema appenninico, estesa per circa 73 km da Belvedere Marittimo ad Amantea. La Catena Costiera è caratterizzata da un materiale cristallino-scistoso, da altitudini modeste (la quota massima è di 1987 s.l.m. a Cozzo del Pellegrino, situato a sud del fiume Argentino) e da grandi ripidi. Tra Cetraro e Guardia Piemontese, la Catena Costiera raggiunge la costa, convogliando i sedimenti ghiaiosi alluvionali verso il mare. La Catena Costiera è una delle aree più piovose d'Italia, con una precipitazione media annua di 2000 mm dovuta alla condensazione orografica di masse d'aria umide provenienti dal Mediterraneo occidentale.

Il sistema idrografico è eterogeneo con diversi coni detritici estesi fino al mare. Tuttavia, gli insediamenti storici più importanti del Tirreno meridionale erano situati in prossimità dei fiumi Lao, Noce-Castrocucco e Savuto, i fiumi più importanti della provincia di Cosenza, caratterizzati da una lieve pendenza del fondo. Il fiume Noce nasce dalle montagne di Lagonegro e si sviluppa tra le regioni Basilicata e Calabria. I fiumi Battindiero e Argentino sono i principali affluenti del fiume Lao, che è per lo più navigabile grazie alla sua portata quasi costante. Il fiume Savuto nasce nella Sila e sfocia nel Golfo di Sant'Eufemia, pochi chilometri a nord di Capo Suvero. I corsi d'acqua minori sono l'Abatemarco a nord di Cirella, il Fiumarello tra Praia e Tortora, il Corvino a Diamante, i fiumi Vallecupo e Soleo a Belvedere Marittimo, il Sanginetto a Bonifati e il Triolo, l'Aron, il S. Giacomo, il S. Nicola, la Fiumarella e i fiumi Bagni tra Cetraro e Acquappesa.

Il clima della regione Calabria è eterogeneo a causa della coesistenza di catene montuose, altipiani e pianure costiere estese fino al mare (**Coscarelli & Caloiero,**

2012; Capra et alii, 2013) e appartiene al clima mediterraneo, con estati secche subtropicali, in cui si verificano rare piogge convettive, e inverni temperati (Caloiero et alii, 2015), secondo la classificazione di Köppen. Le piogge si verificano con un'intensità medio-bassa lungo la costa, con particolare riferimento alla costa ionica. Precipitazioni orografiche medio-pesanti possono interessare la costa tirrenica (Terranova et alii, 2014; Caloiero et alii, 2015). Eventi di pioggia intensa caratterizzano le catene montuose, dove gli inverni sono gelidi e nevosi. Caloiero et alii (2016) dividono la regione Calabria in quattro aree secondo l'indice di De Martonne: semi-arida, sub-umida, umida e iper-umida. La costa tirrenica è per lo più classificata come umida e sub-umida. La temperatura media annua della regione è di 17,9 °C, con una media massima di 26 °C a luglio e una minima di 9,6 °C a gennaio (Pulice et alii, 2013). Il vento prevalente è diretto verso est.

3.1.2 *Patrimonio storico-turistico ed ecologico dell'area*

La parte settentrionale della costa tirrenica cosentina prende il nome di Riviera dei Cedri, estesa per circa 80 km da Tortora a Paola. Il nome trae origine dalla coltivazione locale del cedro (Attlee, 2015; Maruca et alii, 2015), definito dalla Bibbia come il frutto dell'albero più bello, per le caratteristiche uniche del frutto. La festa di Sukkòth rappresenta per gli ebrei l'evento religioso più importante che celebra la liberazione degli ebrei dalla schiavitù in Egitto (Leibowitz, 2010) e consiste nella selezione del miglior cedro da parte dei rabbini stessi. Il cedro, per il suo buon sapore e profumo, rappresenta l'élite del popolo ebraico, laborioso e fedele alla Torah. Lungo la Riviera dei Cedri si trovano anche alcuni edifici cristiani. Il santuario di San Francesco da Paola è il fulcro di molti pellegrinaggi religiosi (Benvenuto, 2019).

Dal II sec. A.C. fino al III-IV secolo d.C., alcuni insediamenti residenziali, denominati villae, hanno fornito non solo il fabbisogno agricolo della terra ma anche un surplus esportabile (Liv., XXXII, 29,3-4). Nella *Historia Naturalis*, liber LII, Plinio il Vecchio (23-79 d.C.) descrive la costa tirrenica meridionale: Proximum autem flumen Melpes, oppidum Buxentum, Graeciae Pyxus, Laus amnis. Fuit et oppidum eodem nomine. Ab eo Bruttium litus, oppidum Blanda, flumen Baletum, portus Parthenius Phocensium et sinus Vibonensis, locus Clampetiae, oppidum Tempa, a Graecis Temese dictum, et Crotoniensium Terina sinusque ingens Terinaeus. Oppidum Consentia intus. Il portus Parthenius Phocensium è probabilmente riferito al porto naturale di Capo Tirone. Il porto era funzionale a diverse esigenze del popolo romano, come la costruzione di flotte navali per le guerre cartaginesi. I boschi dell'entroterra erano facilmente accessibili da Belvedere e la pece bretone veniva utilizzata come collante.

Il termine Tirone, come viene attualmente denominata l'attuale rupe, indicava il luogo di reclutamento del giovane soldato da impiegare nell'oppidum praesidio (Tirò-ne, recluta dell'esercito romano, che dopo un anno di addestramento diventa miles). Dopo l'epoca romana, il patrimonio culturale del litorale trae origine dalle

vicende storiche che caratterizzarono la costa tirrenica meridionale a partire dall'XI secolo (Placanica, 1994).

Le incursioni musulmane minacciarono costantemente i villaggi costieri, modellando lo sviluppo degli insediamenti urbani (Savaglio & Capalbo, 2004). Numerose fortificazioni (ad esempio Amantea, Cetraro, Belvedere Marittimo e Scalea) e torri costiere (Fig. 3-11) caratterizzano la linea di costa (Savaglio & Capalbo, 2003). I villaggi costieri sono stati progressivamente abbandonati, portando allo spopolamento delle aree di Sanginetto e Belvedere Marittimo.

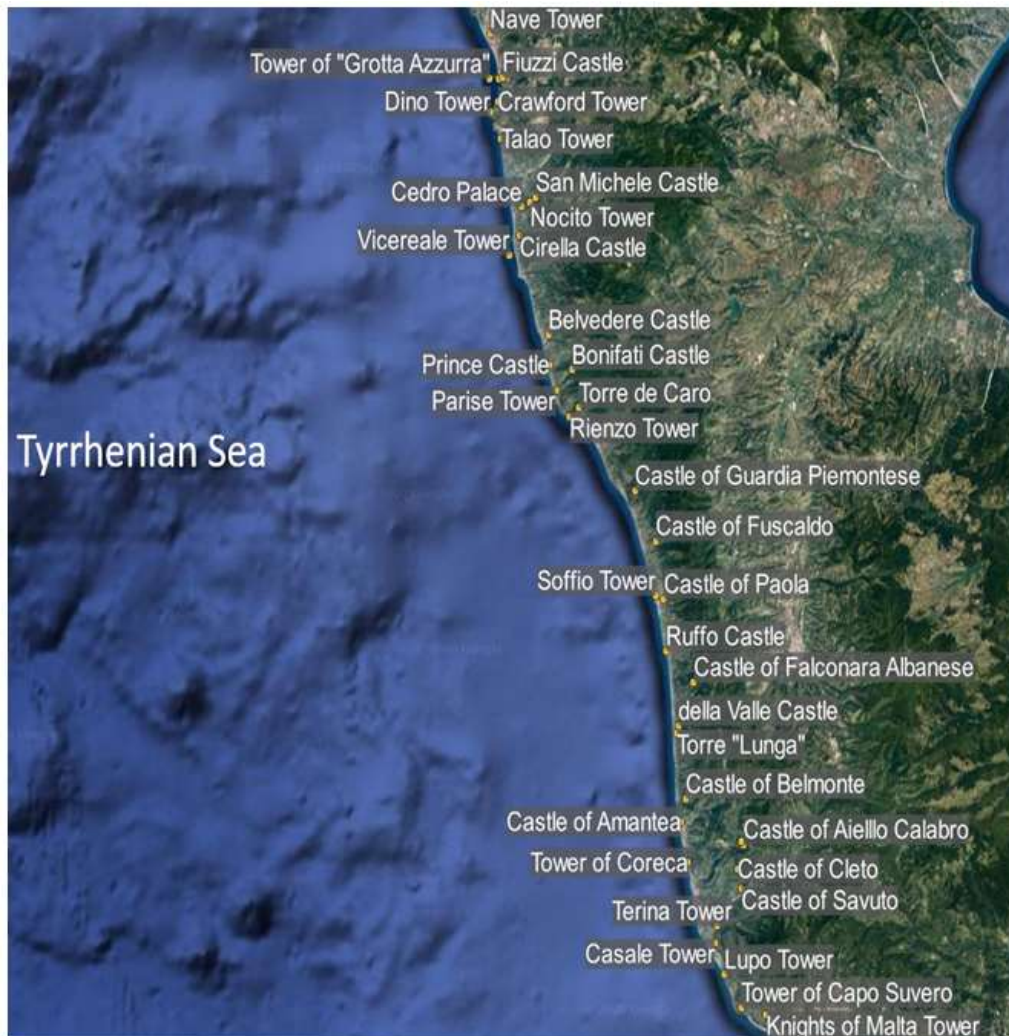


Figura 3-11 - Torri, castelli e fortificazioni lungo la costa tirrenica cosentina. (Da Maiolo et al. 2020c)

La costa tirrenica meridionale possiede un patrimonio naturale di grande valore, tutelato dalla normativa vigente (PAN Life, 2016). È inclusa in Natura 2000, una rete ecologica diffusa nell'Unione Europea. Nella regione Calabria, la rete Natura 2000 comprende 178 Siti di Interesse Comunitario, per una superficie totale di 90.650 ettari.

Nella regione Calabria sono elencati 69 habitat (prioritari e 49 non prioritari), sulla base delle classificazioni individuate nell'Allegato I della Direttiva

92/43/CEE20. Le aree protette più importanti sono il Parco Nazionale del Pollino, la Riserva Naturale della Valle dell'Argentino, la Riserva Naturale della Valle del Lao e il Parco Marino della Riviera dei Cedri, che comprende diversi siti di interesse comunitario (SIC, ad es. SIC IT9310034 Isola di Dino, SIC IT9310035 Fondali Isola di Dino-Capo Scalea, SIC IT9310025 Valle del Fiume Lao, SIC IT9310037 Isola di Cirella, SIC IT931 0036 Fondali Isola di Cirella-Diamante, SIC IT9310038 Scogliera dei Rizzi, SIC IT9310039 Fondali Scogli di Isca, SIC IT9310033 Fondali di Capo Tirone, Figura. 3-12, dove diverse praterie di Posidonia oceanica caratterizzano il fondale).

Le praterie di Posidonia oceanica sostengono l'ambiente e l'ecosistema riducendo l'energia delle onde e il processo di erosione (Maiolo et al, 2020c). Negli ultimi decenni, l'area SIC IT9310033 è stata interessata dall'azione antropica guidata dalla crescente domanda turistica, come la costruzione di reti stradali e ferroviarie, l'abusivismo edilizio e la pesca a strascico, che hanno portato a un degrado ambientale del territorio, con particolare riferimento alla salute della Posidonia oceanica. Inoltre, le spiagge ad alta vocazione turistica e ambientale sono sempre più minacciate dalle mareggiate invernali, che hanno innescato un significativo processo di erosione (Maiolo et al, 2020a).



Figura 3-12 - Area SIC di Capo Tirone, situata nel comune di Belvedere Marittimo. (Da Maiolo et al. 2020c)

3.1.3 Politiche regionali per la mitigazione del rischio costiero

Rispetto a quanto detto, quindi, la Calabria è un territorio che ha nei suoi 780 chilometri di coste la sede di un grande patrimonio culturale e di una elevata potenzialità turistica ed economica. Difatti lo sviluppo costiero della Calabria è spesso associato all'immagine di molti gli scenari riferiti alle molte località marittime distribuite su tutto il territorio che sintetizzano con forte limitazione una più ampia potenzialità.

Ma fra le tante potenzialità delle aree costiere calabresi spesso emerge con prepotenza la criticità rappresentata dai gravosi fenomeni di erosione cotiera che mettono in pericolo ampi ambiti territoriali, i centri urbani e le popolazioni residenti.

La costa tirrenica, a causa della maggiore acclività rispetto a quella jonica, risente in maniera molto più intensa di questa tipologia di fenomeni e, ormai da diversi anni, subisce fortemente l'impatto delle intense mareggiate invernali e primaverili che, oltre a causare perdite di materiale dalla linea di costa, spesso coinvolgono nei loro effetti anche edifici ad uso abitativo e mettono in pericolo le infrastrutture locali.



Figura 3-13 Lungomare di Nocera Terinese, Febbraio 2018

Infatti non sono sicuramente di poco conto gli effetti subiti dai centri abitati costieri, che spesso si trovano ad essere allagati con l'acqua proveniente dal mare, mettendo a repentaglio oltre ai beni materiali gli stessi cittadini che vi abitano.



Figura 3-14 Uomo tratto in salvo dalla sua abitazione a Falerna, durante la mareggiata di Marzo 2018

Storicamente quasi tutti i comuni costieri sono stati colpiti da eventi di mareggiate che hanno provocato danni. Per ultimo, anche recentemente, durante i mesi invernali degli ultimi anni moltissimi comuni hanno subito gli effetti di improvvisi allagamenti causati dalle mareggiate. Dai comuni da Gizzeria a Nocera Terinese nel territorio lametino, fino ai comuni di Diamante e Santa Maria del Cedro nel cosentino, hanno tutti indistintamente subito gravi danni a causa delle intense onde provenienti dal mare.



Figura 3-15 Nocera Terinese, Marzo 2018, fonte 'Il Lametino'

Questi fenomeni oltre ad arrecare un danno al patrimonio, coi conseguenti costi da sostenere per il ripristino dei centri abitati, richiedono poi la manutenzione delle coste stesse, attraverso interventi di ripascimento, ripristino dei litorali, delle strade e dei tratti ferroviari

Gli studi di idraulica marittima, finalizzati allo scopo di difendere le coste da questi eventi, hanno proposto negli anni diverse tipologie di opere, che hanno tutte l'intento di ridurre gli effetti del moto ondoso generando un'area di dissipazione energetica ed un bacino di calma a valle della stessa.

A partire dagli anni '60 su tutta la fascia costiera del Tirreno cosentino si è registrata una forte antropizzazione del territorio, sfruttando le aree pianeggianti a ridosso della Catena Costiera dell'Appennino Calabrese. Negli anni a seguire la linea di costa ha mostrato delle variazioni significative, specialmente erosioni (Figure 3-16), che hanno richiesto un intervento pubblico per limitare i danni alle infrastrutture arrecati dalle mareggiate (Maiolo et al. 2020a).

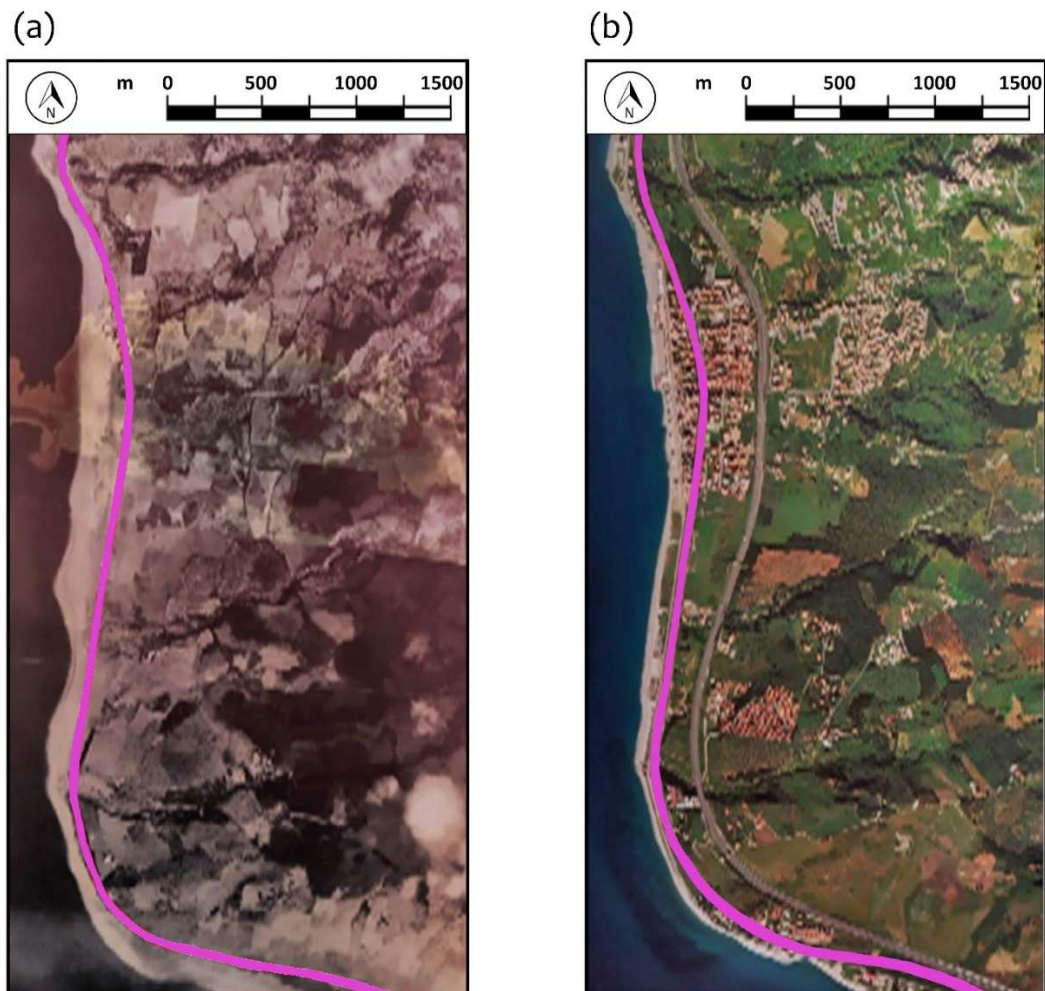


Figure 3-16. Evoluzione della costa tirrenica tra Nocera Terinese e Gizzeria: (a) Volo RAF di agosto 1943, in fucsia la tratta ferroviaria; (b) vista satellitare di giugno 2008, sempre in fucsia la stessa tratta ferroviaria. (Da Maiolo et al. 2020c)

La presenza delle opere antropiche e l'evoluzione delle dinamiche morfoevolutive degli ambienti naturali costieri, ha purtroppo dato inizio ad una fase emergenziale (**Greco et al. 1994**). La presenza della tratta ferroviaria, fondamentale nel collegamento nord-sud, ha ulteriormente evidenziato l'esigenza di iniziare a proteggere la costa dall'azione delle onde. Azione che è avvenuta prevalentemente con interventi emergenziali.

Negli ultimi decenni del secolo scorso, i principali fiumi che trasportano sedimenti grossolani e fini verso la costa sono stati interessati da attività di estrazione a scopo edilizio. Oggi l'escavazione dell'alveo fluviale è vietata, limitando l'arretramento laterale della linea di costa.

Negli ultimi decenni, la Regione Calabria e la Provincia di Cosenza hanno sostenuto un approccio multidisciplinare incentrato sulla protezione del litorale appartenente alla Provincia di Cosenza, promuovendo diverse azioni volte a migliorare la conoscenza delle esigenze del territorio (**Maiolo et al, 2000**). Sono stati condotti diversi studi sulle ex difese a mare per valutarne le carenze strutturali e operative. Questi studi sono stati supportati dal Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria (DDS), dal Centro Studi di Ingegneria Ambientale di Pavia (CSDIA) e dal Coastal & Hydraulics Laboratory dell'Army Corps of Engineers (CHL).

I temi principali degli studi sono:

- sviluppo di un piano di previsione e prevenzione dei rischi nella Provincia di Cosenza;
- analisi preliminare dell'erosione costiera della costa tirrenica meridionale supportata da rilievi topo-batimetrici;
- approvazione del progetto esecutivo per la difesa e il ripristino del litorale situato nei comuni di Bonifati, Sangineto e Belvedere.
- Inoltre, la Regione Calabria e la Provincia di Cosenza, con il supporto degli assessorati all'Ambiente, ai Lavori Pubblici e alla Marina, hanno sviluppato un progetto di sviluppo:
- un piano di bacino preliminare per la valutazione del rischio idrogeologico;
- un piano generale volto a mitigare l'erosione costiera;
- il Programma Operativo Regionale (POR) Calabria 2000-2006 - Interventi a basso impatto ambientale per la protezione delle coste;
- il Programma Operativo Regionale (POR) Calabria 2014-2020 - Progetto TEMAR: tecniche e dispositivi per l'analisi e la valutazione dell'inquinamento delle acque.

3.2 Intervento di riqualificazione a basso impatto ambientale: il ripascimento protetto di Calabaia

L'impatto generale della realizzazione di una serie di opere di protezione costiera in emergenza non è stato totalmente quello sperato. Infatti, in modo diffuso, su tutta la fascia tirrenica cosentina, la protezione dei centri abitati per mezzo di difese rigide ha portato ad una completa e totale alterazione dei regimi morfologici litoranei e, in alcuni casi, fallendo nell'obiettivo di difesa delle opere antropiche.

Alla fine degli anni '90 appare evidente che la situazione di tutto il litorale costiero fosse compromessa, e che la realizzazione di opere di difesa nel decennio precedente avesse portato ad una sovrapposizione di effetti che hanno profondamente alterato la naturalità dell'area, modificando anche la valenza paesaggistica, in particolare sulla spiaggia di Calabaia, dove la linea di costa era ormai a ridosso delle case (Figura 3-17 e Figura 3-18).



Figure 3-17. Calabaia in 2002: (a) una vista da SUD; (b) vista da Nord. (da Maiolo et al. 2020)



Figure 3-18. Vista della spiagge di Calabaia, subito prima dell'intervento di ripascimento, difesa da scogliere emergenti, rimosse successivamente a dicembre del 2002. (da Maiolo et al. 2020)

L'opera di contenimento mediante i muri a mare e le barriere radenti è riuscita nell'intento di salvaguardare il centro abitato dall'azione del moto ondoso, ma ha

causato contemporaneamente un forte fenomeno di erosione sul fondale a ridosso delle barriere.

Nel 2002 viene redatto il “Progetto esecutivo per la difesa e riqualificazione del litorale nei Comuni di Bonifati, Sangineto e Belvedere M. – Tratto da nord Capo Bonifati a nord Capo Tirone”. Tale progetto generale ha previsto di attuare la riqualificazione del tratto di litorale di contrada Calabaia mediante un sistema integrato di riqualificazione ambientale e rinaturalizzazione delle opere di difesa costituito da:

- scogliera sommersa alla quota di - 2,50 m dal medio mare, distante circa 250 m a largo e per una lunghezza di 700 m, realizzata in massi naturali con riutilizzo dei massi in cemento salpati dalle preesistenti barriere radenti;
- pennelli trasversali semisommersi a collegamento della estremità della barriera sommersa con la linea di riva a delimitazione di una cella protetta, realizzati in massi naturali con riutilizzo dei massi in cemento salpati dalle preesistenti barriere radenti;
- ripascimento della spiaggia utilizzando 600.000 m³ di sabbia di quarzo con d50 = 3 mm, analogo a quello naturalmente presente in situ, prelevati da cave a terra.

Le scogliere soffolte nonché le testate dei pennelli, sono stati imbasati mediamente sulle profondità di - 6,00 metri l.m.m., e, quindi, all'incirca nella fascia della cosiddetta “profondità di chiusura”.



Figura 3-19. Schema previsionale dell'intervento: con linea gialla è indicata la linea di riva e con linea rossa la delimitazione delle barriere radenti esistenti all'anno 2002 e con linea tratteggiata bianca la delimitazione della cella del ripascimento protetto. (da Maiolo et al. 2020)

La fase preliminare ha richiesto il reperimento del materiale di cava necessario alla realizzazione delle opere (U.S.A.C.E. – C.H.L. 2000) (Figura 3-20).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3-20. Materiale utilizzato nella realizzazione del progetto. (a) Cava nel comune di Cetraro che ha fornito gli elementi lapidei; (b) cava di Orsomarso, i cui inerti sono stati versati a ripascimento della spiaggia; (c) e (d) fasi di prelievo di materiale fine dal greto del fiume Lao. (da Maiolo et al. 2020)

La realizzazione delle opere è avvenuta utilizzando due tecniche di posa delle barriere: attraverso la realizzazione di piste da terra fino a consentire la posa dei massi mediante gru munita di benna, per uno sviluppo di circa 200 m del tratto a sud, mediante pontone con varo dei massi da mare, per i restanti 500 m del tratto a nord (Figura 3-21).

Al termine delle operazioni di posa da terra è stata rimossa la parte emergente delle piste utilizzate per il transito della gru. Il materiale di base della pista è rimasto posato al fondo ed essendo di granulometria grossolana, nel tempo, ha determinato una alterazione della granulometria della spiaggia a sud conformandola a granulometria grossolana.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3-21. Posa e di rimozione della pista di accesso con riferimento al pennello lato sud. (a) Costruzione della parte emergente del pennello; (b) pontone di ausilio alla costruzione; (c) realizzazione della parte sommersa del pennello. Visibili i blocchi di calcestruzzo provenienti dal salpamento della barriera radente preesistente ed un primo versamento di inerti a ripascimento artificiale; (d) parte sommersa del pennello dopo la rimozione della pista provvisoria. (da Maiolo et al. 2020)



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3-22. Caratteristiche dell'opera ultimata. (a) Vista longitudinale del pennello emerso; (b) barriera soffolta; (c) e (d) vista dell'opera emersa e sommersa. (da Maiolo et al. 2020)

Nel 2006 si sono conclusi i lavori previsti per la riqualificazione ambientale e protezione della spiaggia di Calabaia mediante ripascimento protetto quale soluzione adeguata a consentire un successivo intervento di completa rinaturalizzazione della fascia costiera (Figura 3-22).

Il completamento dell'intervento di rimozione delle difese rigide e la realizzazione del ripascimento protetto della spiaggia di Calabaia ha determinato una positiva trasformazione paesaggistica del tratto di litorale in direzione di una

completa rinaturalizzazione per come è evidente dal confronto tra la seguente Figura 3-23 e la Figura 3-18.



Figura 3-23 . Lavori completati sulla spiaggia di Calabaia (dicembre 2006) (da Maiolo et al. 2020)

3.2.1 Le successive fasi di monitoraggio dell'intervento

L'opera così realizzata è stata, inoltre, monitorata negli anni successivi con rilievi batimetrici (Faraci e Scandura, 2014) che hanno mostrato una buona rispondenza funzionale del ripascimento protetto mostrandosi efficiente nel mantenere il materiale al suo interno, nonostante il clima ondoso invernale, da sempre particolarmente gravoso nell'area d'esame (Figura 3-24).

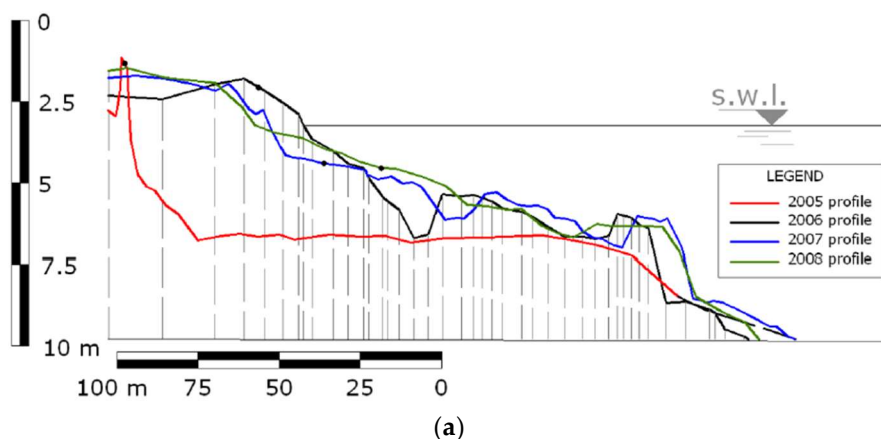


Figura 3-24 . Rilievi batimetrici dell'evoluzione cross-shore del profilo della spiaggia prima (2005) e dopo la costruzione (2006-2008) (Maiolo et al 2020b).

Gli effetti delle onde sul ripascimento e sulla barriera sommersa risultano essere modesti, con una escavazione interna al bacino ed una al piede della barriera, conformi a quanto reperibile in letteratura (Sumer et al. 2005), dimostrando, quindi, un generale mantenimento dell'opera eseguita e il raggiungimento di un profilo di equilibrio.

Ulteriori rilievi batimetrici sono stati effettuati dal 2005 al 2008, sulla base del datum WGS 84 e di due capisaldi (Figura 7), il CS1 (Lat. 39°35'58,9871", Lon. 15°51'37,6292") e il CS2 (Lat. 39°37'00,8050" Lon. 15°51'06,6870"). I rilievi sono stati

eseguiti in alcuni tratti perpendicolari alla linea di costa, dalla ferrovia a 10 m di profondità in mare. I dati raccolti sono stati ulteriormente confrontati per valutare gli effetti delle opere di difesa marina sull'evoluzione della linea di riva (Figura 3-25) (AAVV 2010).

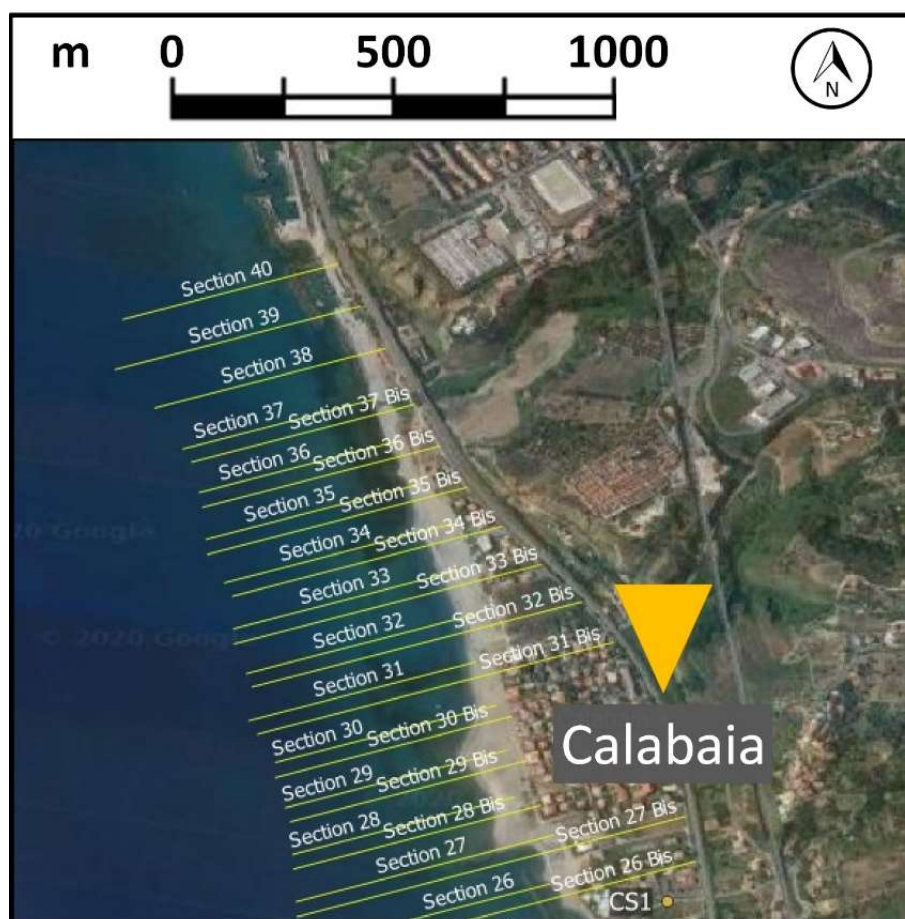


Figure 3-25. Posizione della sezione trasversale utilizzata per i rilievi batimetrici e granulometrici. (Da Maiolo et al. 2020c).

Contestualmente ai rilievi piano batimetrici sono state effettuate le analisi granulometriche sono state effettuate dal 2005 al 2008 mediante la procedura ASTM 200 (ASTM International - Standards Worldwide, 2006). Nella Tabella 3-1 sono riportate le caratteristiche dei campioni di terreno prelevati nel settore 29.

Tabella 3-1. Rilievo granulometrico del 30.05.2005 alla sezione 29.

Sample (N°)	Depth [m]	Ys [kN/m ³]	Gravel [%]	Sand [%]	Silt [%]	Clay [%]	d50 [mm]
2	+1	25,70	52	48	0	0	3
4	0	25,69	23	77	0	0	1,1
6	-2	25,59	58	42	0	0	7,4
8	-4	25,65	0	100	0	0	0,48

Un esempio dell'effetto dei precedenti interventi è fornito dalla Figura 4-17, che si riferisce alla sezione 29 (vedi Figura 3-26) durante l'indagine del 2005. La sezione, situata nei pressi dell'insediamento urbano di Calabaia, mostra una forte pendenza del fondale. Le difese a mare proteggevano solo gli edifici costieri, lasciando indifesa la spiaggia antistante.

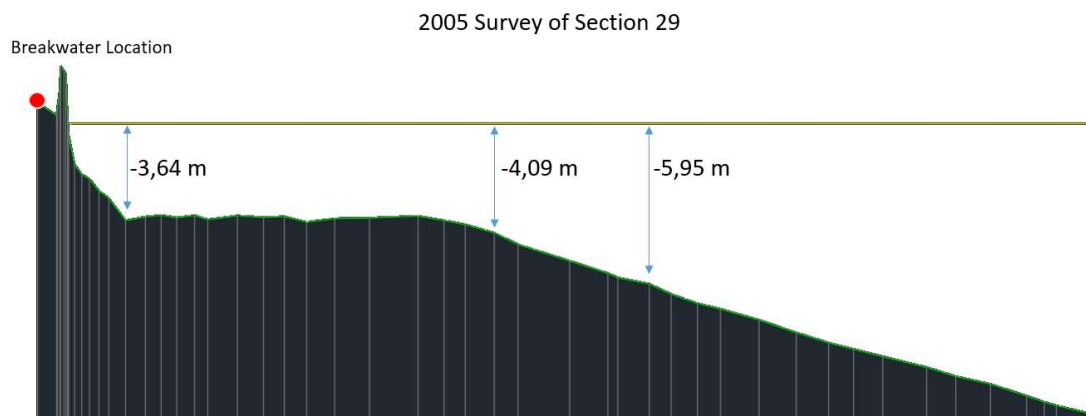


Figure 3-26. Rilievo della sezione 29 eseguito nel maggio 2005. Il punto rosso rappresenta la posizione del primo edificio. (Da Maiolo et al. 2020c) .

Il ripascimento protetto si è rivelato una misura efficace per proteggere la linea di riva. La Figura 19 illustra il profilo del letto della sezione 29 (Figura 3-27) tre anni dopo il ripascimento, evidenziando chiaramente l'ampia spiaggia situata tra la linea di riva e i primi edifici e una profondità subacquea in lieve diminuzione.

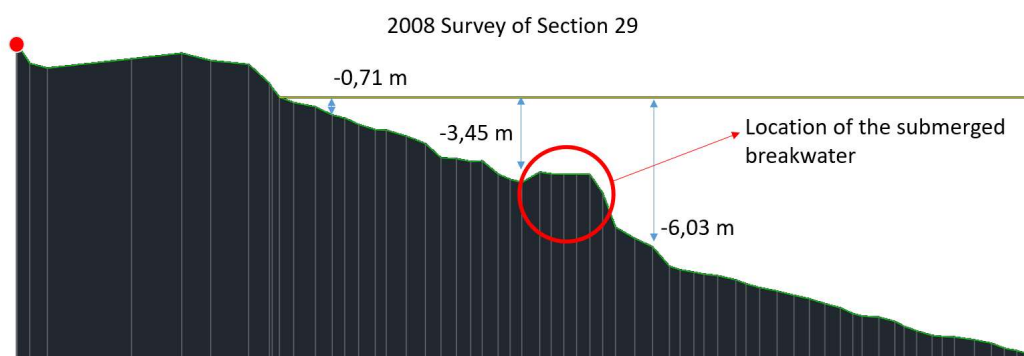


Figure 3-27. Rilievo della sezione 29 di maggio 2008. La pendenza è graduale, con una variazione quasi lineare lungo il profilo. (Da Maiolo et al. 2020b) .

La soluzione dell'accoppiata ripascimento-frangente favorisce sia la protezione del litorale che la fruizione del mare.

L'efficacia del ripascimento protetto è stata valutata confrontando immagini satellitari scattate in periodi diversi (Figura 3-28). (a) illustra la spiaggia di Calabaia nel settembre 2004, quando la linea di riva era vicina agli edifici. (b) mostra l'effetto dell'intervento a dieci anni dalla realizzazione dei lavori, stimato in un aumento dell'area della spiaggia di circa 46.000 m². Sei anni dopo (c) la spiaggia non è

cambiata, a dimostrazione del raggiungimento del profilo di equilibrio della spiaggia.

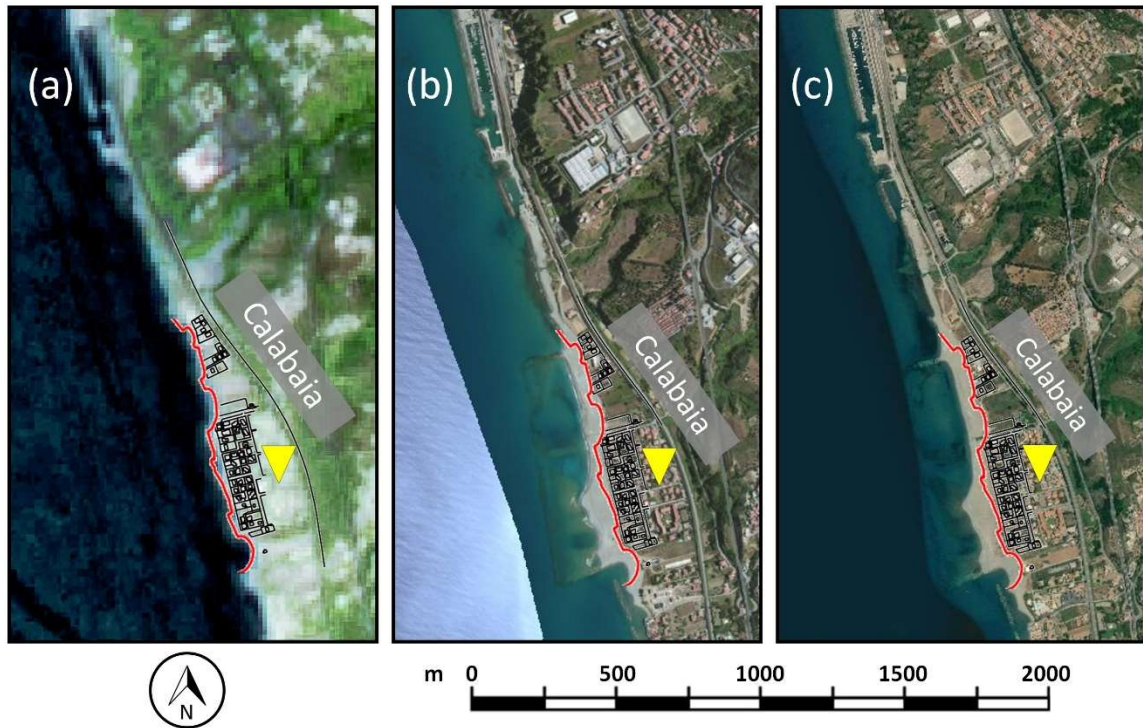


Figure 3-28. Spiaggia di Calabaia. (a) Satellite Aster L1T della NASA, res. 33 m, 14-09-2004; (b) ESRI Wayback Archive, res. 5 m, 20-02-2014; (c) ESRI Wayback Archive, res. 5 m, 29-04-2020. In rosso la linea di riva prima del ripascimento. (Da Maiolo et al. 2020b)

La presenza della barriera e dei pennelli così costruiti determina una cella “chiusa” di contenimento per i sedimenti, proteggendo il ripascimento, ma lasciando contemporaneamente inalterato il paesaggio, distanziando anche la linea di riva dal vicino abitato, con un beneficio anche in termini di protezione dagli allagamenti dovuti alle onde da mare.

Questo aspetto di progressiva diminuzione della profondità del fondale ripristina quelle che erano sostanzialmente le condizioni naturali della batimetria, con effetti importanti sulle onde, che soprattutto durante gli eventi estremi invernali frangono quindi più distanti dalla costa.

La presenza della barriera e dell’area di calma a valle della stessa, con un moto ondoso dotato di minore energia, e quindi di inferiore potere erosivo, si è dimostrata efficace anche sotto l’aspetto biologico, poiché in questa zona i pesci, i crostacei ed i molluschi trovano delle correnti di intensità ridotta, e scelgono questo punto come luogo adatto alla deposizione delle uova, trovando riparo tra i molti anfratti presenti fra i massi, che generalmente mostrano una biodiversità da 10 a 100 volte maggiore rispetto alle aree sabbiose (De Ruig et al. 1993) come effettivamente avviene nelle aree dotate di scogliere naturali (Crain et al. 2009).

3.2.3 Le analisi modellistiche svolte sull'opera

L'intervento di ripascimento protetto della spiaggia di Calabaia è stato successivamente oggetto di progetti di ricerca e di studi scientifici specialistici che ne hanno consentito la verifica sia dal punto di vista modellistico idrodinamico e matematico sia dal punto di vista della simulazione attraverso modello fisico di laboratorio (AAVV 2010).

La valutazione degli effetti del clima ondoso sull'area è stata effettuata, utilizzando il modello numerico del software FLOW-3D, con integrazione delle equazioni numeriche RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) discretizzandole su una griglia spaziale (approccio euleriano) utilizzando la tecnica VOF (Volume of Fluid) per il tracciamento della superficie liquida (Figura 3-29).

Tale valutazione è stata condotta con l'obiettivo principale di verificare l'interazione idrodinamica onda-barriera, attraverso l'analisi dei valori degli sforzi al fondo, le condizioni di stabilità, di erosione e di ricostruzione della spiaggia. Le analisi numeriche sono state svolte considerando un dominio bidimensionale ridotto in scala per essere omogeneo al modello fisico realizzato in laboratorio (Figura 3-31).

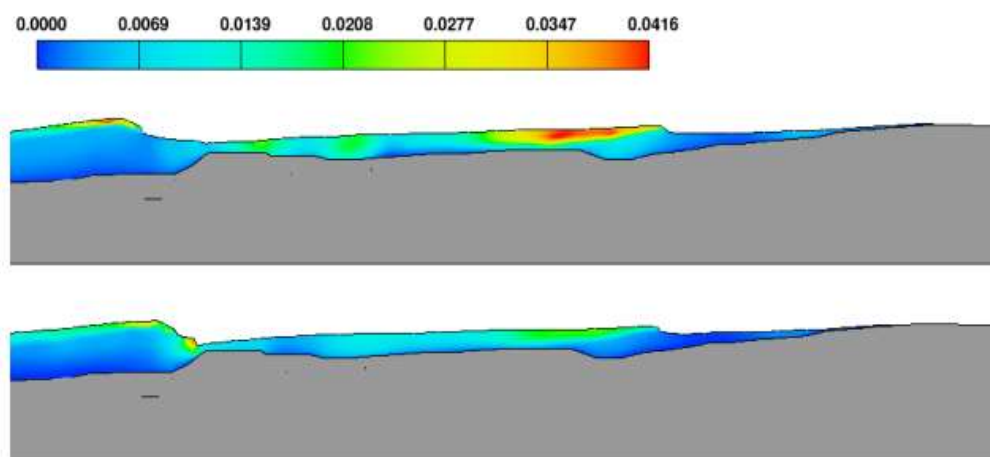


Figure 3-29. Esempio di propagazione di un'onda sul modello computazionale del ripascimento protetto di Calabaia (AAVV 2010).

Al fine di poter verificare l'aderenza delle evoluzioni descritte dal modello con le condizioni reali della barriera si è fatto riferimento ai profili batimetrici ottenuti con i rilievi effettuati durante il 2006 ed il 2007.

I dati di riferimento per le simulazioni numeriche del modello (AAVV 2010) sono riassunte in Tabella 3-2 e Tabella 3-3.

Tabella 3-2. Informazioni del sito di Calabaia di Belvedere Marittimo

Location	H [m]	T [s]	Direction [-°]
Calabaia in Belvedere Marittimo	1.49	8.1	259° [254° is perpendicula to coastline]

Tabella 3-3. Set di onde simulate per l'analisi modellistica in ambiente numerico

Return Period [years]	H [m]	Tm [s]	Tm [s]
5	1.49	9.82	11.82
10	4.89	10.14	12.21
25	5.02	10.55	12.70
50	5.07	10.98	13.04

Le simulazioni sono state eseguite su un dominio bidimensionale, da allineare al modello fisico, con e senza barriera e per diversi climi d'onda, concentrandosi sulle variazioni dell'energia d'onda, dell'assetto d'onda e dell'attrito di fondo prodotti dalla diga sommersa. I risultati mostrano che la barriera aumenta l'assetto delle onde sul retro (Figura 3-30a) e diminuisce l'attrito del fondo (Figura 3-30b).

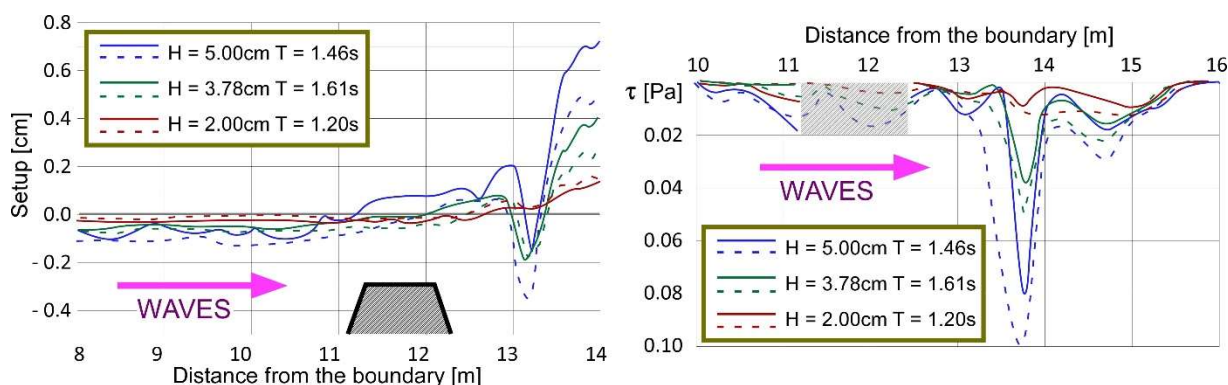
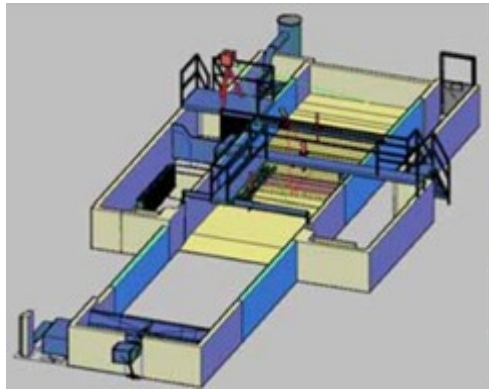


Figura 3-30. Effetto del frangiflutti sommerso per diverse altezze e periodi d'onda: (a) set up delle onde; (b) attrito del fondo. Linee diverse rappresentano le diverse onde in arrivo (linee spesse con il frangiflutti; linee tratteggiate senza frangiflutti). L'effetto è proporzionale all'altezza delle onde (Maiolo et al. 2020b).

Parallelamente alla modellazione numerica è stata effettuata una modellazione su un bacino in scala, lungo 18 metri e largo 3,60 e profondo 1,20 m (Figura 3-31), dotato di un generatore meccanico per il moto ondoso, di sonde resistive per valutare i coefficienti di riflessione e trasmissione delle onde, di un velocimetro doppler acustico, e di un laserscanner 3d.



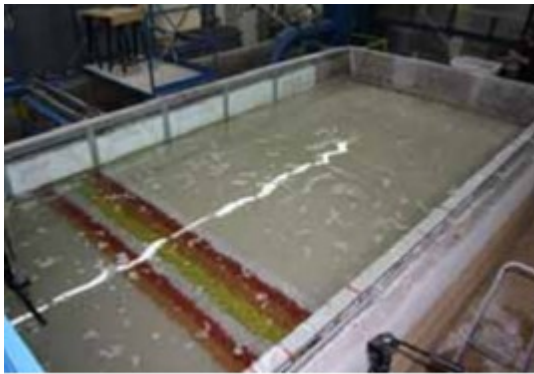
(a)



(b)

Figura 3-31. Vasca sperimentale per la simulazione in scala: (a) modello 3D della vasca; (b) la configurazione finale, con il generatore di onde (AAVV 2010).

Il modello fisico così configurato ha permesso di verificare l'evoluzione sia del materiale utilizzato per realizzare la barriera, sia di quello utilizzato per il ripascimento, sotto l'azione simulata di una mareggiata, che delle onde morfologiche locali (Figura 3-32).



(a)



(b)

Figura 3-32. Experimental tank in function: (a) configuration of the colored stones before the simulation; (b) and at the end of a simulation (AAVV 2010).

Con le dovute limitazioni della scala e delle configurazioni simulabili (es. attacco del moto ondoso obliquo, trasporto longitudinale dei sedimenti, etc.), la configurazione si è dimostrata fundamentalmente stabile. Inoltre, sia nella configurazione in scala che nelle simulazioni numeriche, si è verificato un importante coefficiente di riflessione, facendo registrare un $K_r = 0.30$ e dimostrando la sua efficacia nella riduzione dell'energia d'onda.

4. Metodi numerici per la modellazione bidimensionale dei fenomeni costieri

Come evidenziato nei capitoli precedenti, tra le molteplici minacce accentuate dal cambiamento climatico, le inondazioni costiere nelle aree urbane sono una delle più critiche, con un ulteriore aumento dovuto anche alla minaccia dovuta all'innalzamento globale del livello del mare (SLR – Sea Level Rise) (Mariano et al., 2021), e vista la presenza in tutto il mondo di comunità di grande numero diffuse sulle coste a questo si aggiunge anche la necessità di tenere in considerazione anche il malfunzionamento di opere fognarie costiere dovuto all'aggravio di acque meteoriche ed alla modifica del battente idraulico di progetto (Sinopoli et. al 2020).

Se da un lato gli allagamenti sono un problema costiero che può causa emergenze nel breve termine, bisogna tenere anche in considerazione che le tempeste che si abbattano sui litorali sono il principale fattore che determina l'erosione costiera a breve e lungo termine, rendendo importante la comprensione delle cause e il modo di verificarsi degli eventi, individuando come modellare correttamente l'idrodinamica sottocosta, e considerando quindi anche gli effetti dei cambiamenti climatici (Besio et al., 2017).

Ciò è particolarmente significativo nel caso di ambienti di piccole dimensioni, con escursioni relativamente contenute per le maree come il Mar Mediterraneo, dove si prevede che gli eventi estremi si sovrappongano agli scenari di SLR in maniera frequente e significativa, incrementando il rischio di inondazioni anche nel caso di una possibile riduzione delle mareggiate (Androulidakis et al., 2015; Gaeta et al., 2018).

Avendo evidenziato la durabilità dell'opera individuata nel sito di Calabaia e avendo constatato la sua efficacia nel mantenere il profilo di spiaggia realizzato circa venti anni prima, si è deciso quindi di indagare in maniera dettagliata il caso studio.

L'approccio scelto per le indagini è stato quindi quello di individuare una modalità utile a simulare mareggiate e allagamenti che si sono abbattuti sulla costa tirrenica, con lo scopo di comprendere come l'opera possa aver avuto effetti non soltanto dovuti alla presenza della barriera in termini di attenuazione dei fenomeni d'onda, ma cercando di comprendere anche quelli dovuti alla presenza della spiaggia a tergo.

Infatti, la presenza di una spiaggia, lungo la quale le onde possano risalire e subire l'effetto dissipativo dell'attrito col fondo, attenua l'entità dei fenomeni d'onda, secondo quanto descritto dal fenomeno di Run-Up (Mase, 1989) (Figura 4-1) e del conseguente massimo livello di risalita R dell'onda proveniente da largo:

$$R = 0,88 \left(\frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \right)^{0.69} H_0$$

in cui :

H_0 è l'altezza significativa d'onda incidente;

β è l'angolo di inclinazione della spiaggia;

L_0 è la lunghezza d'onda a largo

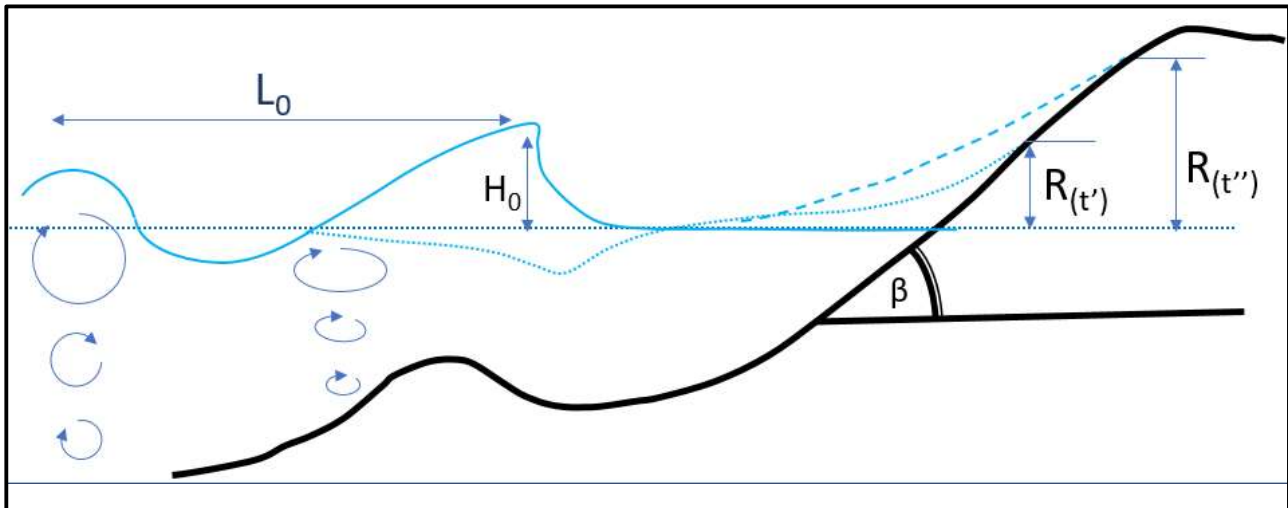


Figure 4-1 Il RUN-UP, fenomeno di risalita delle onde lungo la spiaggia.

Secondo questo principio, all'aumentare dell'angolo di pendenza della spiaggia aumenta la capacità di risalita delle onde lungo la costa, poiché comprensibilmente la presenza di una spiaggia poco acclive e molto lunga protegge l'entroterra offrendo una ampia superficie sulla quale dissipare energia, ancor più se protetta da una barriera sommersa come nel caso studio.

Considerando che questi sono solamente una parte dei fenomeni che avvengono a causa delle onde e della loro conversione di energia, al fine di valutarne la complessità e la sovrapposizione in contemporanea, si è quindi reso necessario individuare degli strumenti di analisi e simulazione che siano in grado di tenere in considerazione un sistema così complesso.

Si è scelto quindi di utilizzare dei modelli matematici che simulino l'idrodinamica costiera, e siano in grado di valutare correttamente l'efficacia a lungo termine delle strutture di difesa dai fenomeni provenienti dal mare.

In aggiunta a quanto detto, la complessità di questi modelli può risultare all'atto pratico particolarmente elevata, in quanto utilizzano in genere schemi di calcolo tridimensionali per la simulazione dei processi legati alle sospensioni bentoniche, alla flocculazione, al trascinamento, all'erosione, alla sedimentazione e al consolidamento del fondo.

Va inoltre tenuto in conto che la modellazione costiera bidimensionale (2D) e tridimensionale (3D) richiede solitamente un costo computazionale significativo, limitando la maggior parte delle analisi all'uso di sistemi monodimensionali o di modelli statistici (Callaghan et al 2009, Li et al 2019, Hur et al 2012, Sharifamdian et al 2014).

Negli ultimi decenni sono stati sviluppati diversi modelli per calcolare l'evoluzione morfodinamica degli ambienti costieri, caratterizzati da diversi schemi di calcolo, scale, livelli di dettaglio e costi computazionali (Anastasiu 1997, Komen 1994, Young 1999, Ekebjærg 1991, Mel et al 2019, Mel et Al 2019), con scale di applicabilità che possono variare dai metri ai chilometri a seconda dei casi e dei fenomeni da descrivere, mentre la scala temporale varia tipicamente da ore a decenni.

La maggior parte dei modelli a grande scala esistenti si limita a valutare l'evoluzione della linea di riva, mentre i modelli a scala spaziale e temporale più piccoli sono utilizzati principalmente per riprodurre eventi di forzanti specifiche, coinvolgendo metodologie esplicitamente riduzioniste in cui la conservazione della quantità di moto costituisce il mezzo esplicito per l'evoluzione del sistema. (Syvitski et al 2010, Short et al 2013, Hamza et al 2019).

Per questi motivi si è deciso di studiare l'area attraverso un modello complesso che fosse in grado di gestire contemporaneamente sia le caratteristiche generali dell'area e di valutare la complessità dei fenomeni d'onda, ma che fosse anche in grado di tenere in conto gli effetti sulle onde dovuti ai ripascimenti protetti, per poter valutare l'efficacia di questa tipologia di difesa costiera (Sorensen 1988, Gonzalez et al 1999).

La scelta è ricaduta sul modello idrodinamico costiero MIKE 21/3 Coupled Model FM 2020 proposto dal DHI, un modello 2D accoppiato, in grado di elaborare il clima ondoso locale, i processi idrodinamici e il trasporto al fondo in un'unica simulazione, che verrà di seguito brevemente descritto al fine di contestualizzarne l'uso all'interno di questo elaborato.

4.1 La modellazione idraulica marittima attraverso il software MIKE 21-3FM

Il modello di idrodinamica costiera MIKE 21-3 Coupled Model FM utilizzato in questo elaborato è basato su delle computazioni numeriche effettuate su di una griglia non strutturata (detta anche *mesh* nei manuali) che rappresenta lo spazio fisico da simulare attraverso una discretizzazione in elementi triangolari di diversa dimensione.

Il modello di simulazione invece consiste in un "*sistema di modelli*", integrati tra di loro e che sono quindi in grado di scambiare informazioni tra di loro, in maniera tale da poter riprodurre i processi costieri e la dinamica della linea di riva a tutte le scale spaziali e temporali.

In questa maniera attraverso MIKE è possibile valutare l'efficacia degli interventi di difesa del mare, come l'ottimizzazione dei ripascimenti e delle strutture di protezione costiera, e l'impatto quindi delle mareggiate sulla parte edificata della spiaggia.

Il modulo idrodinamico di MIKE risolve le equazioni di Navier-Stokes 2D dei fluidi incomprimibili, sotto l'ipotesi di pressione idrostatica (DHI 2017). La soluzione numerica delle equazioni delle Shallow Water Equations è ottenuta attraverso il risolutore

approssimato di Riemann (**Roe 1997**), che calcola i flussi convettivi all'interfaccia dell'elemento della griglia. La precisione del secondo ordine è ottenuta attraverso l'uso di una tecnica di ricostruzione lineare del gradiente. Il gradiente medio è calcolato con l'approccio di Jawahar e Kamath (**2000**).

Le equazioni che descrivono i fenomeni ondosi sono le *Conservative Wave Actions Equations* (**Anastasiu 1997, Komen 1994**), che possono essere scritte utilizzando il sistema cartesiano come:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma}$$

dove $N(\theta, \sigma)$ è la densità dell'onda, che è funzione di θ , angolo della direzione dell'onda e della frequenza dell'onda σ . S è il termine sorgente che tiene conto di diversi processi:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

- S_{in} è l'azione del vento;
- S_{nl} è l'interazione non lineare delle onde;
- S_{ds} è l'effetto di white capping (schiuma bianca sull'onda);
- S_{bot} è l'azione dissipativa del fondo;
- S_{surf} è la dissipazione dovuta ai fenomeni di frangimento delle onde.

Tra questi parametri, S_{surf} è un parametro essenziale per rappresentare il frangimento delle onde, che si verifica quando le onde si propagano in acque poco profonde e non sono più sostenute dalla colonna d'acqua, ma collassano su loro stesse. Questo processo è descritto secondo la formulazione di Battjes e Janssen (**1978**).

Il modello tiene in conto che se il litorale è caratterizzato da acque poco profonde che lo circondano, l'altezza massima delle onde può essere calcolata come:

$$H_{max} = \gamma d$$

dove d è la profondità dell'acqua e γ un coefficiente che varia tra 0,5 e 1, a seconda della pendenza del fondo e delle caratteristiche dell'onda (**Eldeberky et al 1996**).

La formulazione di γ può essere scelta secondo le formulazioni di Nelson (**1987, 1994**), oppure mediante il più recente approccio di Ruessink (**Ruessink et al 2003**), valido sia per fondali ripidi senza barre sia per fondali piatti. L'approccio di Ruessink calcola γ in ogni cella del dominio come:

$$\gamma = 0.76kd + 0.29$$

dove k è il numero d'onda locale e d la profondità locale.

Il modello è anche in grado di valutare il trasporto al fondo, ottenuto mediante il modulo quasi tridimensionale STPQ3D (DHI 2017), che calcola il trasporto dei sedimenti lungo due direzioni orizzontali elaborando i dati di input forniti dal modello idrodinamico e mediando i risultati nel tempo.

È bene non considerare trascurabile il movimento dei sedimenti in acque poco profonde a causa del frangimento, derivante dall'effetto delle onde che circolano sottocosta, con particolare riferimento al trasporto dei sedimenti trasversale alla costa, che è il principale elemento attivo nel processo di erosione (Aagard et al 2004, Elfrink 1996), e che può essere significativo per l'analisi di un caso studio come quello di Calabaia.

I cambiamenti morfologici dovuti all'erosione e alla deposizione di materiale al fondo sono rappresentati in termini di variazione della quota del fondale, espressa rispetto al centro di ogni elemento triangolare della griglia di calcolo nominata in precedenza.

Questo parametro può essere calcolato mediante l'equazione di continuità dei sedimenti secondo quanto riportato da Murillo (2010), dove n è la porosità:

$$z_{new} = z_{old} + \frac{1}{1-n} \frac{\delta z}{\delta t} \Delta t_{HD} \quad (6)$$

La variazione del quantitativo di materiale al fondo è quindi calcolata come la divergenza del flusso di sedimenti rispetto al bordo degli elementi ed è uguale alla somma di tutti i flussi che attraversano i lati degli elementi triangolari, identificando quindi se l'elemento sta ricevendo (aumento della quota assoluta) o perdendo sedimenti (diminuzione della quota assoluta):

$$\frac{\delta S_x}{\delta x} + \frac{\delta S_y}{\delta y} = \sum_{i=1}^m S_{in} ds_i \quad (7)$$

dove

- S_{in} è il flusso di sedimenti normale alla faccia dell'elemento;
- ds_i è la lunghezza della faccia dell'elemento;
- m è l'indice dell'elemento;

L'equazione di continuità dei sedimenti influenza quindi la variazione dell'elevazione del letto di ciascun elemento, in base al flusso totale di sedimenti che attraversa i confini di ciascun elemento.

L'accoppiamento dei vari modelli brevemente presentati si basa sulla definizione di un passo temporale complessivo del sistema, necessario per far coincidere l'istante in cui i modelli scambiano le informazioni.

Il sistema di modellazione ha un passo temporale generale al quale corrisponde l'output dei dati, ed ogni singolo modello (idrodinamico, d'onda e di erosione) ha un proprio passo

4.2 Modellazione degli effetti delle barriere sommerse sui fenomeni d'onda

Essendo lo scopo principale di questo elaborato quello di individuare e quantificare gli effetti delle opere di difesa costiera, è da porre particolare attenzione sulla possibilità di valutare concretamente l'efficacia delle barriere soffolte sullo smorzamento delle onde.

Questo approccio è stato applicato alla spiaggia di Calabaia, per una valutazione di massima dell'evoluzione a lungo termine della linea di riva.

La progettazione generale di una difesa costiera richiede innanzitutto di individuare come si possa valutare l'effetto dell'ostacolo rispetto alla riduzione dell'altezza d'onda tra il lato offshore e quello della riva. Un approccio semplificato ma utile per la comprensione del problema è il coefficiente di trasmissione d'onda K_t (Sottit 1972):

$$K_t = H_{out}/H_{in} \quad \text{with} \quad 0 < K_t < 1$$

in cui H_{out} e H_{in} indicano rispettivamente l'altezza d'onda a monte e a valle della barriera (Rahimzadeh 2014).

Sebbene questo approccio semplificato non descriva la variabilità del clima ondoso e il possibile effetto delle strutture antropiche, è coerente con lo scopo di questo studio. È immediato comprendere come il caso ideale sia quello di un coefficiente di trasmissione pari a 0, dove le onde sono annullate, e quindi non si hanno effetti a tergo dell'opera. Come visto nel capitolo 2 e 3 questo tipo di opere esistono, ma possiedono una serie di controindicazioni paesaggistiche, ambientali ed ecologiche, che ne sconsigliano l'applicazione, facendo propendere per l'approccio con le opere sommerse.

Per valutare però gli effetti delle barriere soffolte sullo smorzamento delle onde è necessario utilizzare delle considerazioni di carattere differente e in realtà più variabile, che sono tipicamente valutate attraverso la formulazione di Goda (1967, 1969) che calcola il coefficiente di trasmissione K_t come:

$$K_t = K_{t,max} \quad \text{if} \quad \frac{f}{H_i} < \left(\frac{f}{H_i}\right)_{min} \quad \text{with} \quad K_{t,max} < 1$$

$$K_t = \frac{1}{2} \left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\frac{f}{H_i} + \beta}{\alpha} \right) \right) \quad \text{if} \quad \left(\frac{f}{H_i}\right)_{min} < \frac{f}{H_i} < \left(\frac{f}{H_i}\right)_{max}$$

$$K_t = K_{t,min} \quad \text{if} \quad \frac{f}{H_i} < \left(\frac{f}{H_i}\right)_{max} \quad \text{with} \quad K_{t,min} > 0$$

- I valori di $K_{t,max}$ e $K_{t,min}$ sono impostati in base alle condizioni al contorno;
- il parametro *freeboard* (cioè il *livello di sommergenza*) rappresenta l'altezza della cresta della barriera meno il livello della superficie;
- H_i il valore dell'altezza dell'onda in arrivo, cioè l'altezza dell'onda in ingresso.

Se la barriera è sommersa, l'effetto di smorzamento delle onde è trascurabile quando l'altezza delle onde è uguale o inferiore alla profondità della cresta, calcolata rispetto al livello medio del mare.

Per il parametro α , Goda ha proposto un valore pari a 2,2, mentre per il parametro β , che dipende dall'inclinazione del frangiflutti, un valore compreso tra 0,15 e 0,8 (**Goda 1967, 1969**). La formula di Goda consente di valutare le prestazioni della barriera a diversi livelli d'acqua e non è influenzata dall'angolo di attacco delle onde rispetto alla barriera.

4.3 Il modello accoppiato SWAN-2DEF

Purtroppo, a causa dell'assenza di dati direttamente raccolti in campo per mancanza di una boa o di un altro strumento di misura, e quindi con lo scopo di quantificare in qualche modo la validità di quanto simulato attraverso MIKE, si è successivamente scelto di produrre parallelamente le stesse simulazioni con un ulteriore modello idrodinamico.

La scelta è ricaduta sull'utilizzo di un ulteriore modello accoppiato, composto dal modello idrodinamico 2DEF (Defina et al., 1994; Defina, 2000) e dal modello di onde di terza generazione Simulating Waves Nearshore (SWAN, vedi Stopa et al, 2011; Garcia-Medina et al., 2021).

La terza generazione del modello d'onda SWAN è stata sviluppata dall'Università di Tecnologia di Delft ed è ampiamente utilizzata per previsioni ad alta risoluzione di onde offshore e near shore, inclusa la zona di surf (Holthuijsen et al., 1993; Ris et al., 1994).

SWAN è un modello spettrale completamente discreto basato sull'equazione di bilancio dell'azione dell'onda, guidato dalle condizioni al contorno e dai venti locali, che considera implicitamente l'interazione tra onde e correnti attraverso le sollecitazioni di radiazione (Phillips, 1977; Booij et al., 1996). Lo schema di propagazione numerica implicita riduce significativamente lo sforzo computazionale in acque poco profonde. Adotta una formulazione euleriana dell'equilibrio spettrale discreto della densità d'azione che tiene conto della propagazione per rifrazione su batimetria e campi di corrente arbitrari (Booij et al., 1999). La generazione del vento, la rottura delle onde indotta dalla profondità, il white-capping, la dissipazione indotta dal fondo, le interazioni onda-onda triade e quadrupla sono rappresentate esplicitamente. I risultati di SWAN concordano bene con le soluzioni analitiche, il laboratorio e le osservazioni (Booij et al., 1999).

Il modello idrodinamico 2DEF risolve le equazioni 2D complete delle acque basse su griglie triangolari non strutturate attraverso un metodo semi-implicito ad elementi finiti sfalsati, basato su un approccio misto euleriano-lagrangiano (Defina, 2003). Il modello 2DEF adotta un approccio statistico a sottogriglia per le quote di fondo (Defina et al., 1994; Defina, 2000), ottenendo un trattamento fisicamente basato, accurato e stabile dei processi di bagnatura e asciugatura (D'Alpaos e Defina, 2007). L'approssimazione di Boussinesq (Stansby, 2003) è stata adottata per determinare le tensioni di dispersione orizzontale integrate in profondità, mentre la viscosità eddy è risolta secondo Uittenbogaard e van Vossen (2004). Il modello 2DEF è stato ampiamente utilizzato nell'ingegneria fluviale (ad esempio, Martini et al., 2004; Viero et al., 2013; Mel et al., 2020). Negli ultimi anni, il 2DEF è stato accoppiato con un modulo vento-onda che risolve l'equazione di conservazione dell'azione ondosa parametrizzata utilizzando il momento di ordine zero dello spettro dell'azione ondosa nel dominio della frequenza (denominato WWTM, vedi Carniello et al., 2005). Il WWTM è stato ampiamente utilizzato nella Laguna di Venezia e in altri corpi idrici costieri poco profondi e di transizione semi-chiusi (ad esempio, Mariotti et al., 2010; Zarzuelo et al., 2018; Mel 2021; Mel et al., 2021). In particolare, le semplificazioni adottate

nel modulo WWTM per le onde del vento non sono adatte a produrre analisi affidabili in mare aperto.

In questo studio, il 2DEF è stato accoppiato con SWAN per studiare l'idrodinamica nearshore dell'area oggetto di interesse. L'accoppiamento è ottenuto attraverso uno scambio di campi istantanei del livello del mare, delle correnti superficiali e delle quote di fondo da 2DEF a SWAN, mentre lo stress da radiazione e la velocità d'onda valutati da SWAN vengono passati a 2DEF.

Il modello accoppiato SWAN-2DEF così descritto fa un uso sostanzialmente simile delle equazioni di modellazione dei vari fenomeni, rendendosi un riscontro utile per comprendere dei possibili errori nelle tarature.

Le principali differenze con il modello MIKE risiede nel fatto che il modello proposto dal DHI propone la stessa griglia di calcolo per tutti e tre i sottomodelli utilizzati, mentre nel caso del modello di comparazione SWAN utilizza una griglia strutturata con elementi rettangolari (rettangolari o quadrati), mentre 2DEF adotta una griglia non strutturata con elementi triangolari, e quindi è stato possibile utilizzare la stessa griglia di calcolo utilizzata per MIKE.

Al fine di avere la migliore somiglianza computazionale tra le due situazioni la griglia del modello SWAN è inclusa nei confini del dominio 2DEF., e gli elementi della griglia SWAN hanno dimensioni in termini di superficie simili a quelle della griglia 2DEF e la loro quota di fondo si basa su un'interpolazione della griglia 2DEF.

5. Metodologie di raccolta dati e integrazione di data-set per la caratterizzazione della morfologia dell'area del caso studio di Calabaia

Col fine di comprendere la potenziale replicabilità del caso di studio individuato nel sito di Calabaia, risultato essere una buona pratica nel problema dell'erosione, si è reso necessario quindi raccogliere informazioni circa l'area d'esame.

Per questo motivo, parallelamente all'indagine di carattere generale per la caratterizzazione del sito, è stato necessario individuare accuratamente le informazioni effettivamente disponibili per la realizzazione di simulazioni e di scenari di previsione sul medio-lungo periodo.

Ci si è quindi concentrati sulla individuazione di due tipologie di informazioni:

- **1. Raccolta e integrazione di informazioni di tipo plano-batimetrico**, ed eventuali aggiornamenti nel tempo dei dati disponibili, necessari per ricostruire lo "stato di fatto" della spiaggia emersa e sommersa;
- **2. Caratterizzazione meteoclimatica dell'area**, al fine di poter procedere alla simulazione di eventi compatibili con quelli che si verificano nell'area, o addirittura poter ricostruire specifiche mareggiate avvenute nel tempo;

Dalla raccolta dati evidenziata nel capitolo 3 è stato immediatamente evidente come per entrambe le tipologie i dati disponibili risultavano pochi, frammentari e discontinui nel tempo.

Dal punto di vista della caratterizzazione morfologica dell'area in particolare, le poche informazioni disponibili sono risultate essere solamente quelle relative alle campagne di monitoraggio dell'opera realizzata a Calabaia (datate 2003, 2005 e 2008), quindi non particolarmente utili ai fini di simulazioni di dettaglio.

Sotto l'aspetto della caratterizzazione climatica la situazione non è risultata essere particolarmente migliore poiché non sono state presenti boe e di altri strumenti meteoclimatici per lunghi periodi, con conseguente carenza di dati dettagliati e di serie storiche, e quindi una totale assenza di analisi di lungo periodo alle quali affidarsi.

Come evidenziato nel capitolo precedente, entrambi i tipi di informazioni risultano essere necessari per la realizzazione di una simulazione di dettaglio, e quindi si è immediatamente resa evidente la necessità di individuare sistemi di raccolta dati e metodologie di analisi necessarie alla caratterizzazione morfologica del dominio di calcolo, ed alla realizzazione di un data-set per la caratterizzazione delle forzanti di onde e vento

in ingresso al modello.

5.1 Raccolta di informazioni di tipo plano-batimetrico e creazione per il caso studio di una griglia di calcolo dettagliata.

I dati morfologici locali disponibili in partenza per la realizzazione delle simulazioni erano relativi alle campagne di monitoraggio dell'opera.

Come già accennato si tratta di tre serie di dati relative a delle sezioni all'interno ed all'esterno della barriera e del ripascimento.

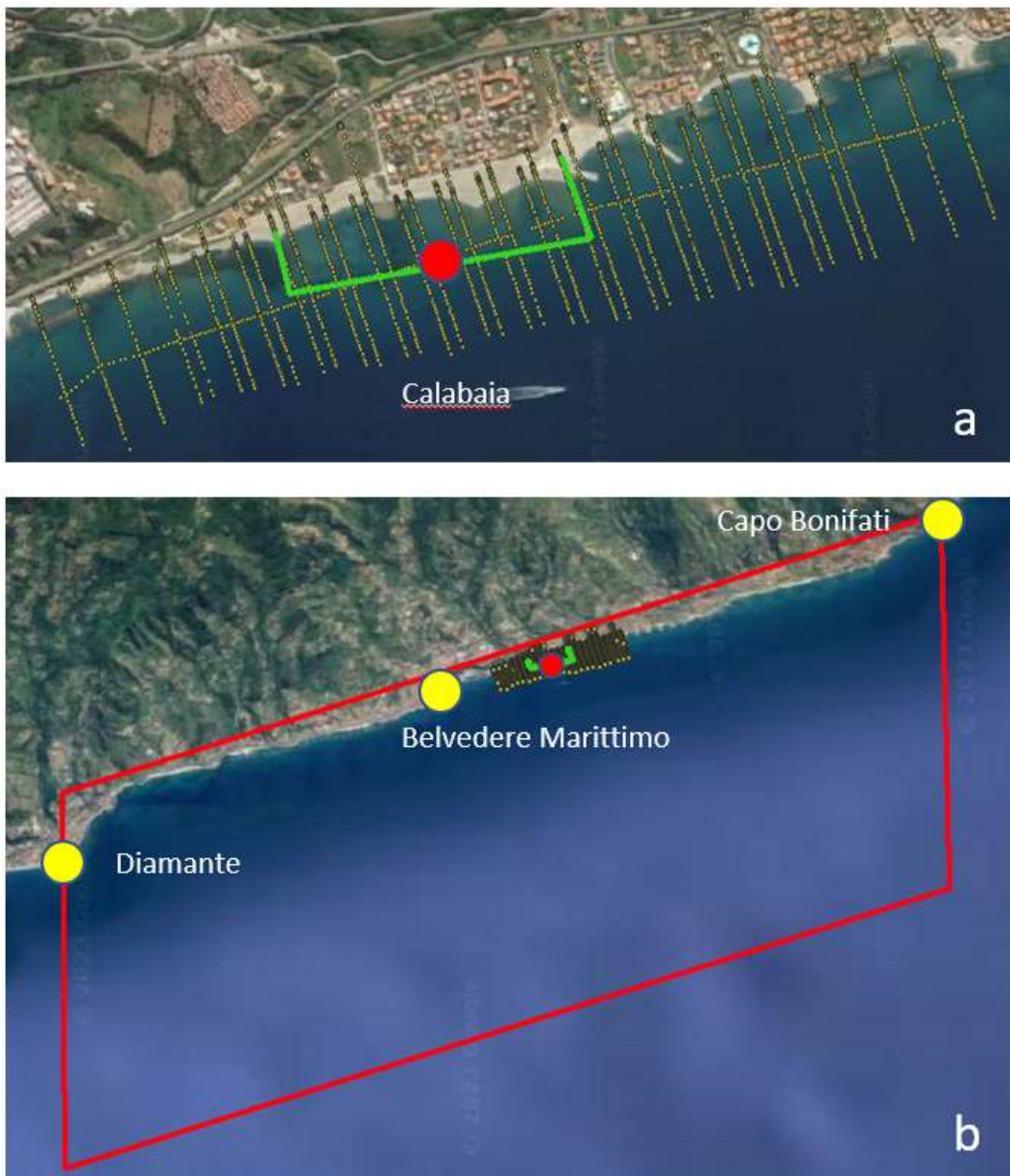


Figura 5-1 a) punti disponibili dalle campagne di monitoraggio rispetto alla barriera (verde); b) dati disponibili dalle campagne di monitoraggio rispetto all'estensione effettiva del paraggio Diamante-Bonifati;

In Figura 5-1 è rappresentata la copertura di dati relativi alle campagne di monitoraggio della barriera in relazione alla dimensione del paraggio da esaminare sul tratto di costa Diamante-Bonifati all'interno del quale ricade Belvedere Marittimo e quindi anche Calabaia.

Nella ricerca di informazioni non sono emerse altre campagne di raccolta dati o carte delle batimetrie particolarmente dettagliate, e per quanto si potesse ritenere sostanzialmente poco variata la spiaggia, sia per la presenza dei corazzamenti costieri sia per la buona riuscita del ripascimento protetto, ci si è resi conto che era necessario individuare una campagna di indagine specifica per migliorare l'attendibilità delle simulazioni.

Il paraggio oggetto di studio parte a Nord dal promontorio nel comune di Diamante, e si estende per circa 15,5 km verso sud, fino a Capo Bonifati nell'omonimo comune. Al fine di tenere in considerazione tutti gli effetti di correnti e relativi movimenti sottocosta l'area di analisi è stata estesa per 5 km a largo della linea di costa, producendo quindi un'area di 77,5 km quadrati sulla quale raccogliere informazioni batimetriche.

5.1.1 Dati batimetrici di largo provenienti dal data-set EMODnet.

Essendo l'area particolarmente estesa è risultato evidente ricorrere ad una banca dati già presente.

Per la copertura generale dell'area si è deciso di utilizzare la raccolta di dati batimetrici provenienti dal progetto europeo EMODnet (European Marine Observation and Data Network), che fornisce diversi tipi di dati, in particolare quelli batimetrici, per le aree marine dei paesi che ricadono nella Comunità Europea e nel bacino del Mediterraneo.

I database EMODnet riuniscono set di dati batimetrici provenienti da rilievi in situ, DTM composti e prodotti di batimetria derivata da satellite, che sono gestiti e descritti in servizi di catalogo conformi alle prerogative INSPIRE.

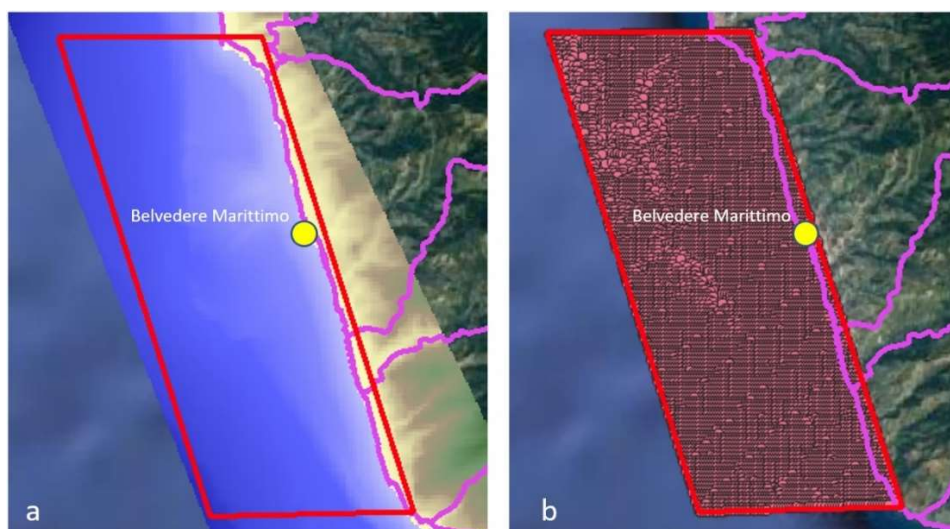


Figura 5-2 a) Area del DTM estratto dal portale EMODnet confrontata col paraggio Diamante-Bonifati (rosso) ; b) punti esgtratti ricadenti nel paraggio Diamante-Bonifati (rosso)

Per l'area in esame è stato quindi individuato sul portale del progetto il tratto di costa, e da qui è stato estratto un DTM delle batimetrie che contenesse il paraggio Diamante-Bonifati (Figura 5-2). Il tipo di dato fornito dal progetto per l'area è un modello digitale a maglia regolare, composto da elementi di una estensione di circa 90x90 metri.

Questo tipo di informazione è idonea a rappresentare l'area di largo del paraggio, ma risulta essere particolarmente inadatta alla simulazione di dettaglio, e quindi non molto valida per rappresentare l'area di studio più prossima alla costa di Calabaia (figura 5-3), poiché gli elementi rappresentati i dati sono nello stesso ordine di grandezza delle opere che si vogliono rappresentare.

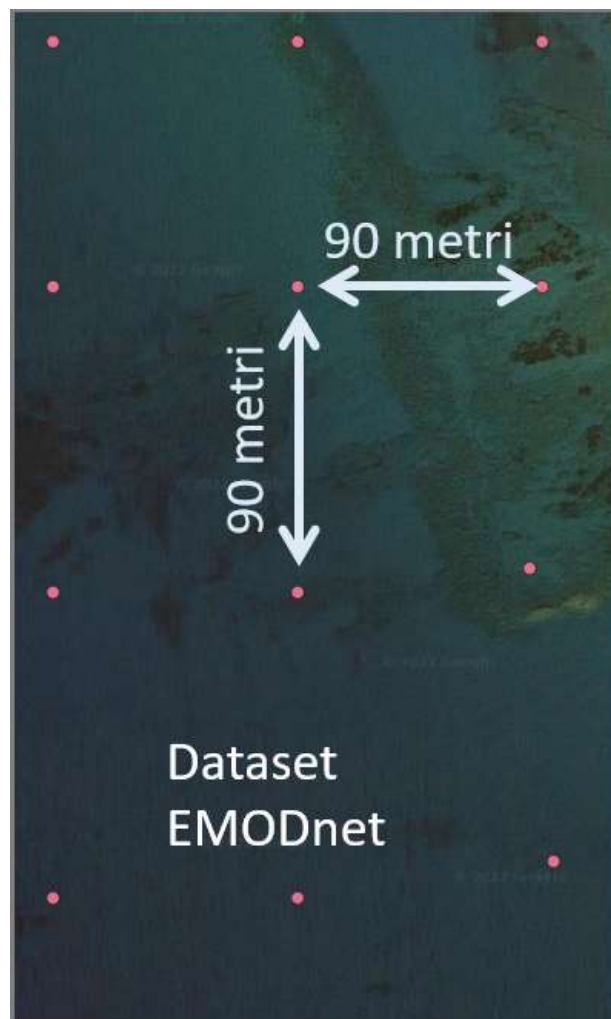


Figura 5-3 Esempio di dettaglio dei dati EMODnet ricadenti nell'area del paraggio

5.1.2 Campagne di raccolta di informazioni di tipo plano-batimetrico.

Considerando l'estensione dell'opera realizzata a Calabaia, pari a circa 700 metri lungo costa per una sezione trasversale di circa 300 metri, questi dati sono risultati troppo dettagliati per poter essere utilizzati.

Si è scelto quindi di optare per due campagne di rilievo dell'area di Calabaia e di Belvedere, una eseguita tramite un drone UAV per la parte emersa ed una per la parte sommersa eseguita tramite ecoscandaglio sonar posto su una imbarcazione.

Per il rilievo topografico della parte emersa è stato utilizzato un UAV DJI Matrix 300 RTK (Figura 5-4a, precisione di posizionamento 1,0 cm in orizzontale e 1,5 cm in verticale), dotato di telecamera Zenmuse P1. Le caratteristiche principali della fotocamera sono: dimensioni del sensore 35,9 x 24 mm (full frame); risoluzione 45 MP (dimensione dei pixel: 4,4 μm); obiettivo 35 mm F2,8; FOV63, 5°; intervallo di apertura f/2,8 - f/16. L'area totale coperta dall'UAV è stata di circa 40 ettari, volando a un'altitudine di 120 m dal suolo.

I 672 scatti (Figura 5-4b) sono stati post-elaborati con un software fotogrammetrico, che ha prodotto: nuvola di punti densa (più di 150M punti), ortofoto (Figura 5-4c), modello digitale di superficie (DSM) e modello digitale del terreno (DTM) (Figura 5-4d). La risoluzione dell'ortofoto e del DSM è di 1,47 cm/pixel, quella del DTM di 7,35 cm/pixel.

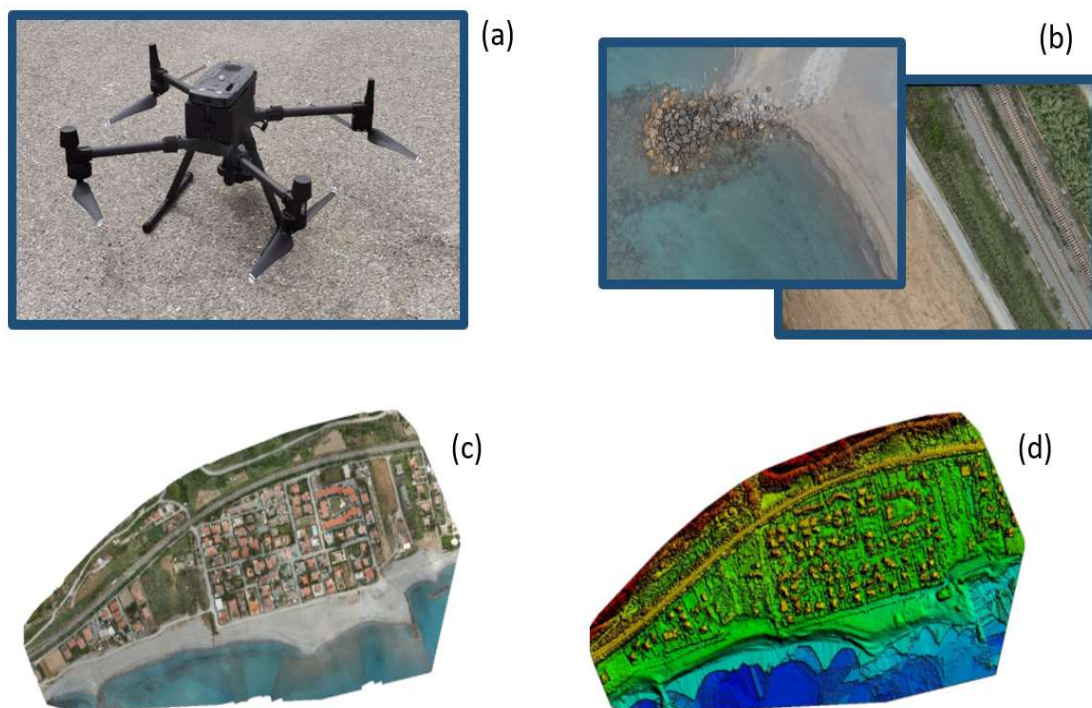


Figura 5-4. (a) il drone DJI utilizzato per la raccolta dati; (b) immagini di esempio dell'estensione degli scatti; (c) ortofoto di dettaglio dell'area di Calabaia; (d) DTM del terreno; (Da Mel. et al. 2022)

Questo set di dati è stato integrato da ulteriori rilievi batimetrici eseguiti per mezzo di un ecoscandaglio Lawrence Hook9 v.2 montato su un'imbarcazione, in dotazione alla Stazione Sperimentale Marina di Capo Tirone – hub del Laboratorio di Ricerca di Gestione Sostenibile delle Risorse Idriche, che emette un fascio di suoni verso il fondale marino, permettendo di rilevare la batimetrica locale (Figura 5-5).

Questi rilievi aggiuntivi sono stati eseguiti tra giugno e ottobre 2021, per un totale di circa 1 milione di punti campionati tra le varie due campagne di raccolta dati.

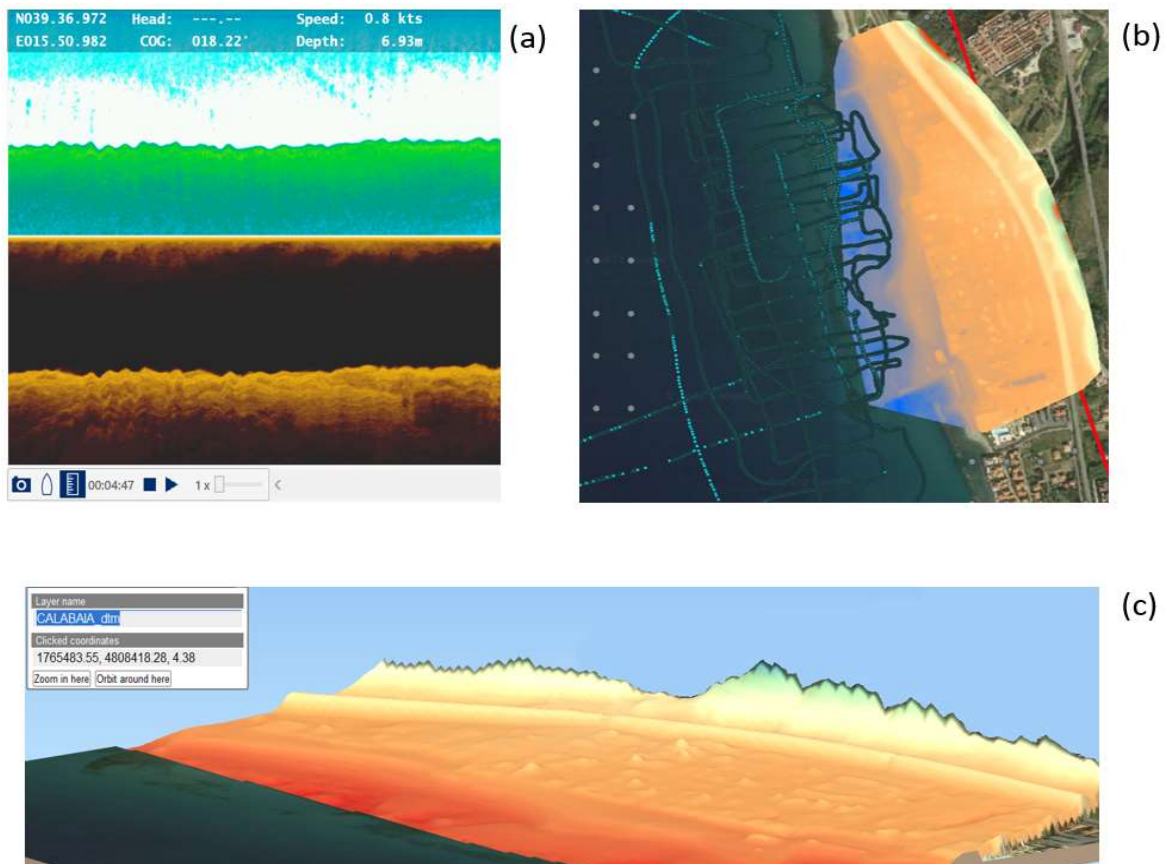


Figura 5-5. (a) parte della scansione ottenuta tramite sonar nell'area di Belvedere Marittimo; (b) sovrapposizione dei dati batimetrici e altimetrici delle campagne; (c) modello plano batimetrico finale relativo all'area costiera di Calabaia; (Da Mel. et al. 2022)

5.2 Integrazione dei dataset plano-batimetrici e costruzione della griglia di calcolo dettagliata per il paraggio Diamante-Bonifati.

I dati raccolti per l'area di largo e quella di Calabaia e Belvedere sono stati integrati in un unico gruppo di punti, attraverso il processamento dei vari set informativi tramite un software GIS per omogenizzare i sistemi di riferimento e poterli sfruttare i dati in un unico insieme di punti che potesse caratterizzare l'area di studio (Figura 5-6).

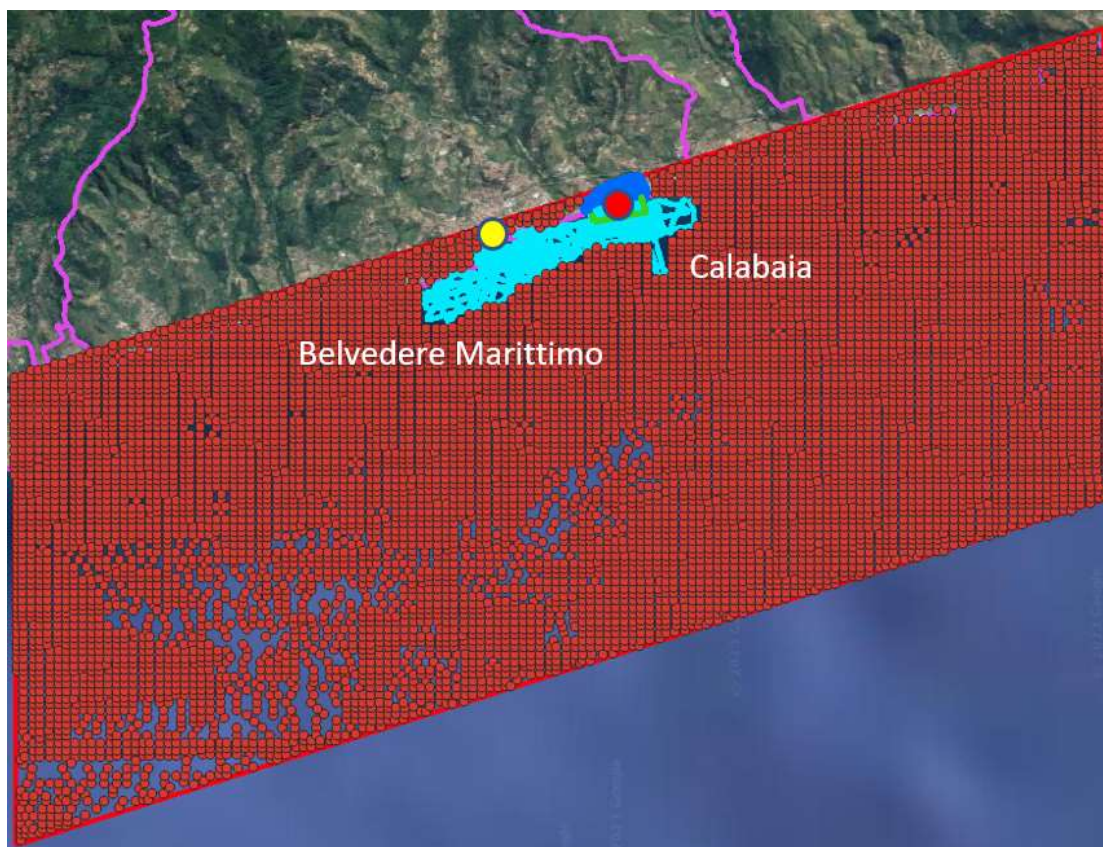


Figura 5-6 Copertura dati nel paraggio Diamante-Bonifati, in rosso i dati EMODnet, in azzurro i dati da ecoscandaglio, in blu i dati da fotogrammetria derivata da volo UAV. Il punto giallo indica il comune di Belvedere, quello rosso la spiaggia di Calabaia;

Da queste informazioni è stato quindi possibile derivare tutte le caratteristiche planobatimetriche dell'area, ed in funzione della densità di dati è stato possibile quindi anche definire la griglia di calcolo dettagliata sulla quale sono state svolte le successive simulazioni (Figura 5-7).

Al bordo esterno i triangoli partono da un lato massimo di 500 metri, e avvicinandosi al sito di Calabaia la dimensione diminuisce fino a 20 metri di lato massimo dei triangoli. I

n questa maniera l'area di interesse è rappresentata attraverso l'utilizzo di elementi più piccoli, potendo rappresentare più in dettaglio i fenomeni. L'area di largo è rappresentata invece da elementi di dimensione maggiore, che risultano adeguati visto la scarsa interazione dei fenomeni col fondale, e contemporaneamente permette di ridurre i tempi computazionali (Figura 5-7).

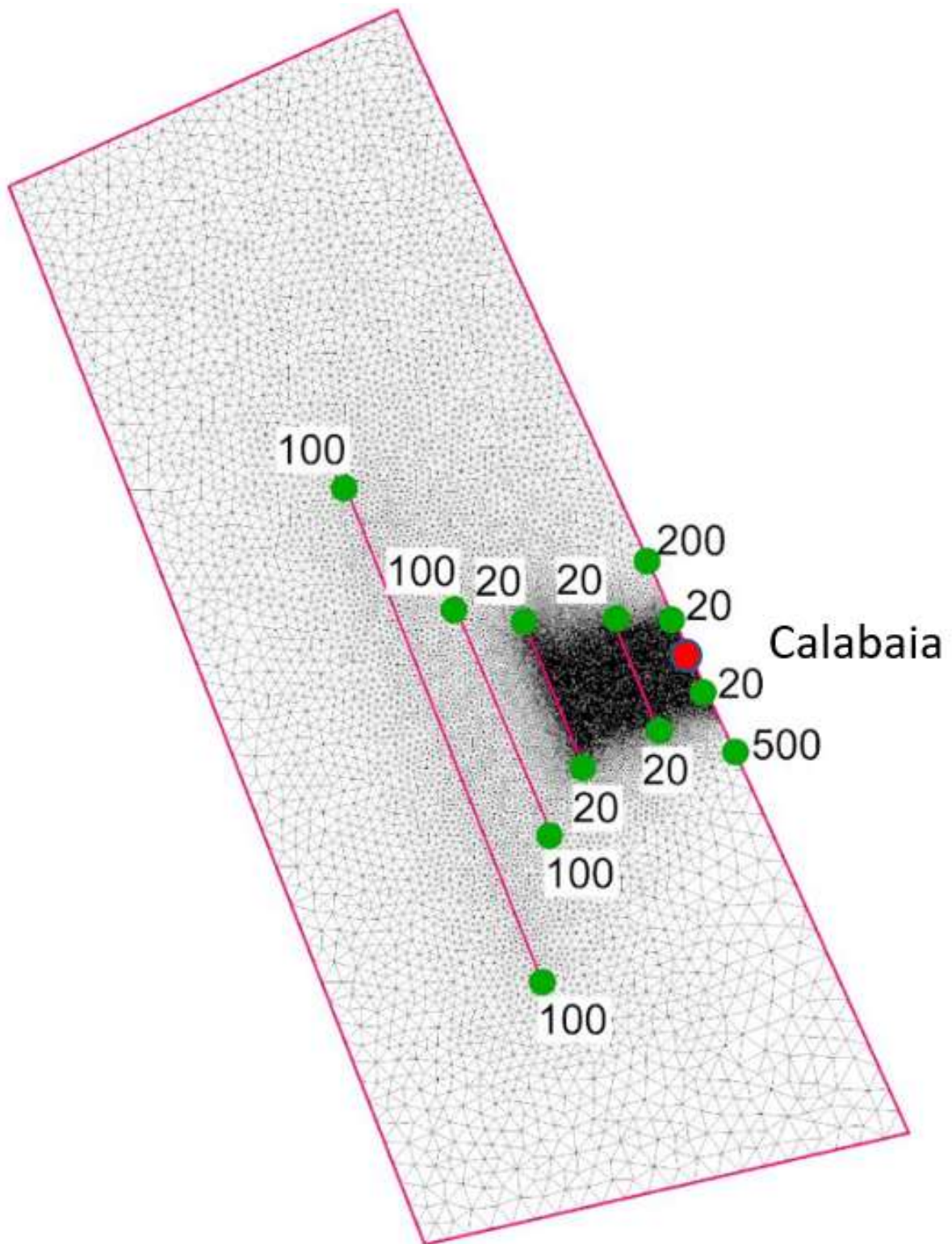


Figura 5-7 Griglia di calcolo per le simulazioni. Ad ogni linea viola corrisponde una modifica della dimensione del lato dei triangoli utilizzati per discretizzare lo spazio. Al bordo esterno i triangoli partono da un lato massimo di 500 metri, e avvicinandosi al sito di Calabaia la dimensione diminuisce fino a 20 metri.

6. Individuazione delle informazioni sul clima locale e caratterizzazione meteo-climatica dell'area del caso studio.

La conoscenza del clima ondoso locale e una caratterizzazione affidabile del clima del mare e del vento giocano un ruolo fondamentale per la gestione dei rischi costieri.

Purtroppo, una delle informazioni meno dettagliate per l'area di Belvedere Marittimo è risultata essere la caratterizzazione meteo-climatica locale. Già nel 1939 Bossolasco, e con la successiva nota del 1957, aveva indicato opportuno il posizionamento di un anemometro per la raccolta di dati di vento.

Gli unici dati presenti nell'area di studio provengono da una coppia di boe meteomarine, una localizzata a Cetraro, circa 12 km più a SUD, ed una localizzata a Ponza (Figura 6-1). Sfortunatamente la Boa di Ponza è particolarmente distante, e non in grado di intercettare appieno lo spettro di fenomeni che si sono abbattuti nel tempo sull'area, mentre la boa presente a Cetraro ha raccolto, dati in periodi intervallati, per soli 9 anni prima di venire dismessa, rendendo le informazioni raccolte poco utili.



Figure 6-1. Localizzazione della spiaggia di Calabaia e delle boe di Ponza e di Cetraro. (Lo Feudo et al. 2020d)

Un lungo set di dati osservati omogenei ad alta risoluzione spazio-temporale e una modellazione numerica accoppiata vento-onda ad alta risoluzione sono essenziali per soddisfare le esigenze di progettazione di strutture costiere e offshore e per preservare

l'habitat delle aree marine. La variabilità del clima ondoso richiede misure sul campo a medio e lungo termine con un'adeguata risoluzione spaziale e temporale (**Jena et al. 2020**).

I dati delle boe possono fornire una caratterizzazione più accurata del clima del mare attraverso dati del vento e del moto ondoso, se confrontati con le analisi globali, poiché i modelli locali dei campi d'onda differiscono dal mare aperto, a causa della complessa geometria della costa, del riparo delle isole e della lunghezza variabile del fetch del vento. Tuttavia, l'eterogeneità del tipo, della morfologia e dell'estensione delle aree costiere, insieme all'incertezza nel calcolo del bilancio radiativo terrestre e dei processi di crescita e dissipazione dell'energia ondosa, limitano la conoscenza e l'identificazione dei processi specifici che influenzano questi ambienti (**Lee et al. 2016**).

Il clima ondoso sottocosta è legato alle onde di mare morto, generate dal vento che soffia lontano dalla linea di costa, che si propagano liberamente attraverso il mare, in alcuni casi con direzioni diverse rispetto al vento originale, e alle onde di mare vivo, generate dal vento locale e fortemente influenzate dall'eterogeneità spaziale della morfologia delle aree interne della costa (**Bolanos et al. 2007; Yang et al. 2019**).

Per questo motivo diversi studi sono stati condotti per sviluppare e perfezionare modelli climatici a scala globale e regionale per identificare ogni possibile cambiamento nelle dinamiche meteorologiche e oceaniche, come la temperatura e le precipitazioni (**Giorgi et al. 2004**); le fluttuazioni pluriennali (**Vecchi e Wittemberg 2010**); la pericolosità del mare ventoso, delle onde di swell e di surge (**Pasaric e Orlic 2004; Conte e Lionello 2014**); nonché l'efficacia e le implicazioni dell'uso di tecniche di downscaling (**Bellafiore et al. 2012**).

Purtroppo, mancando la strumentazione in loco, e senza l'ausilio di dati raccolti durante le mareggiate, è impossibile procedere a delle analisi di eventi specifici.

Tuttavia, ad oggi, è possibile fare uso di ampi dataset a scala di Mediterraneo, come ad esempio le Reanalisi v5 del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (di seguito denominate ERA5).

Sfruttando i dati ERA5 è stato possibile accedere a circa 70 anni di dati rianalizzati a ritroso nel tempo, e confrontarli con i dati di boa di Cetraro, conducendo delle analisi più robuste e significative. La maggior parte degli studi per la stima del clima d'onda sono validati su pochi anni di dati d'onda (**Erdik e Beji 2018; Gippius e Myslenkov 2020a**); nel nostro caso è stato utilizzato un set di dati omogeneo di dieci anni alla boa di Cetraro nel periodo 1999-2008 (Fig. 5-11).

Poiché non sono disponibili dati di boa dal 2009 a oggi, nel periodo 2009-2019 il confronto è stato condotto tra ERA5 con il modello d'onda WAM, applicato a scala regionale (risoluzione spaziale di 4,5 km).

6.1 Set di dati disponibili

Nell'area di studio, le direzioni prevalenti dei venti sono comprese tra 30°N e 150°N, mentre la costa è interessata dalle onde di marea generate nel Mediterraneo occidentale (direzione delle onde in arrivo da 210°N a 330°N).

L'escursione media delle maree primaverili a Capo Tirone è di circa 0,5 m; pertanto, le correnti di marea e le interazioni onda-corrente non sono significative. Le tempeste che colpiscono l'area sono principalmente caratterizzate da una depressione al suolo situata nel golfo di Genova che si sviluppa sottovento alle Alpi e si muove verso sud.

Questo pattern innesca intensi venti occidentali su tutto il Mar Tirreno, ed è denominato "tipica tempesta tirrenica" (**Federico e Bellecci 2004**). Il clima eolico locale è fortemente influenzato dall'orografia del litorale, poiché la Catena Costiera, estesa fino alla linea di costa, è alta più di 1000 m s.l.m.

Sono stati analizzati i seguenti parametri climatici:

- Altezza significativa dell'onda (SWH);
- Altezza massima dell'onda (HMAX);
- Direzione dell'onda in arrivo (θ);
- Periodo medio dell'onda (T_m);
- Periodo di picco dell'onda (T_p);
- Velocità del vento a 10 m (W_{10});
- Direzione del vento in arrivo (θ_{Wind}).

6.1.1 Dati Provenienti dalla boa di Cetraro

In questa analisi è stato utilizzato il dataset decennale di clima ondoso (dal 27 febbraio 1999 al 5 aprile 2008) basato sui dati raccolti da una boa Datawell Waverider (Triaxys) posizionata a Cetraro (39°27'12" N, 15°55'06" E, 100m di profondità, vedi Figura 5-1), appartenente alla Rete Nazionale Italiana di Misura delle Onde Marine (RON, vedi **Bencivenga et al. 2012**).

Questo tipo di boa è regolarmente adottato nell'ingegneria costiera e marina e può essere considerato un equipaggiamento standard del settore (**Fairley et al. 2017**). La boa di Cetraro ha raccolto l'altezza significativa delle onde, il periodo e la direzione a intervalli di 30 minuti. Non sono disponibili dati sul vento da questo sensore.

La boa di Cetraro si trova a circa 10 km a sud di Calabaia (Figura 5-1) e non fornisce una copertura spaziale completa della regione. Tuttavia, può supportare la validazione dei modelli ERA5 e WAM, che possono essere ulteriormente utilizzati per esplorare e riprodurre il clima ondoso della regione.

Per quanto piccolo questo dataset risulta fondamentale perché i modelli matematici possono riprodurre i campi d'onda bidimensionali, simulando la crescita e la dissipazione

dell'energia ondosa, ma occorre prestare molta più attenzione alla mancanza e agli errori dei dati misurati (Cavaleri et al. 2018;).

6.1.2 Dati provenienti dal modello hindcast ERA5

ERA5 è l'ultima rianalisi hindcast atmosferica globale prodotta da ECMWF, successore dei modelli FGGE, ERA-15, ERA-40 e ERA-Interim.

ERA5 si basa su una versione più recente del modello ECMWF Integrated Forecast System (IFS 41r2), che si estende dal 1950 a oggi. Il set di dati di ERA5 è ad accesso libero presso il Copernicus Climate Change Service (Hersbach e Dee 2016; Hersbach et al. 2018).

I principali miglioramenti di ERA5 IFS rispetto alle versioni precedenti sono:

1. il passo temporale di uscita (un'ora),
2. la risoluzione orizzontale ($0,25^\circ$ per i parametri climatici; $0,50^\circ$ per i parametri d'onda),
3. la risoluzione verticale (137 strati verticali che si estendono dalla superficie del suolo fino al livello contraddistinto da una pressione pari a 0,01 hPa),
4. l'implementazione di parametri aggiuntivi (ad esempio, microfisica, convezione, pressione superficiale, concentrazione di ozono),
5. la tecnica di assimilazione dei dati.

Rispetto ai suoi predecessori, ERA5 migliora la stima di diverse variabili climatiche, tra cui le precipitazioni e la convezione tropicale (Nogueira 2020), la temperatura della superficie terrestre (Johannsen et al. 2019), la radiazione solare downwelling alla superficie (Urraca et al. 2018) e il clima del vento (Ramon et al. 2019).

Attualmente, il dataset ERA5 viene esteso ogni tre mesi. Poiché l'analisi di un lungo set di dati è fondamentale per produrre una tendenza affidabile a lungo termine, in questa analisi è utilizzato l'intero set di dati di 70 anni di ERA5, esteso da gennaio 1950 a dicembre 2019, con una risoluzione temporale di sei ore di SWH (m), Hmax (m), θ (deg), Tp (s), Tm (s) e W10 (m/s). Di seguito, si è fatto riferimento al punto di uscita ERA5 situato a ovest di Cetraro ($39,5^\circ$ N, $15,5^\circ$ E, quasi 500 m di profondità).

6.1.3 Interpretazione e integrazione dei dati attraverso il modello WAM

Per riprodurre le tempeste che si sono verificate nell'ultimo decennio, quando i dati di misura della boa di Cetraro non erano disponibili, è stato utilizzato il WAVE Model hindcast (WAM), un modello d'onda ad alta risoluzione sviluppato dal Wave Model Development and Implementation Group (WAMDI Group 1988). Le simulazioni WAM sono state eseguite per un periodo di undici anni, tra il 2009 e il 2019, come integrazione al set di dati delle boe, da confrontare con i dati di misura ERA5.

Il modello WAM sfrutta un risolutore per le equazioni spettrali d'onda per caratterizzare lo spettro d'onda bidimensionale, con in ingresso la forzante del vento

proveniente dall'ECMWF a 10 m (**Federico et al. 2005**). È stata utilizzata una configurazione nest tra due griglie di calcolo, una con risoluzione orizzontale di $0,1^\circ$ e una con $0,05^\circ$ sia in direzione Nord-Sud che nella direzione Est-Ovest. Come condizioni al contorno iniziali e dinamiche, sono stati utilizzati i dati del vento ECMWF con risoluzione orizzontale di $0,25^\circ$ e passo temporale di sei ore. I parametri di output sono SWH, θ e T_m , il passo temporale di output è di tre ore per l'intero periodo di dati.

6.2 Metodologia di acquisizione e confronto dei dati

Al fine di valutare l'andamento climatico e la variabilità interannuale dei parametri marini nell'area di Belvedere Marittimo, la prima operazione effettuata è stata quella di acquisire i dati provenienti da ERA5 su un periodo di 70 anni.

L'affidabilità dei dati provenienti da ERA5 sono state valutate in via preliminare confrontando i risultati dell'hindcast con le osservazioni della boa di Cetraro nel periodo febbraio 1999 - aprile 2008.

I dati di ERA5 sono stati raccolti ogni sei ore nel dominio di calcolo (00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UTC). Il confronto è stato fatto sull'altezza, il periodo e la direzione delle onde attraverso alcuni parametri statistici standard e metriche di errore, ovvero media, mediana, varianza, 10° e 90° percentile, deviazione standard (SD), errore quadratico medio (RMSE), errore assoluto medio (MAE), valore medio aritmetico degli errori (Bias), indice di dispersione (SI) e coefficiente di correlazione (R^2).

La significatività statistica dell'andamento annuale e stagionale di SWH e T_m è stata calcolata attraverso il test di Mann-Kendall (MK) (**Mann 1945; Kendall 1975**), approvato dall'Organizzazione meteorologica mondiale per la valutazione delle tendenze idrometeorologiche (**Kundzewicz e Robson 2000**) e ampiamente utilizzato nell'analisi del clima ondoso (si veda **De Leo et al. 2020** per un'applicazione nel Mar Mediterraneo).

Per stimare la pendenza lineare delle correlazioni è stato utilizzato lo stimatore di Sen (SSE).

Infine, è stato utilizzato il metodo Innovative Trend Analysis (ITA), confrontato con i test MK e SSE (**Sen 2012**). Le formulazioni dei parametri statistici e delle metriche di errore utilizzati sono descritte nell'Appendice A. Tra i criteri adottati per rimuovere gli outlier (**Caloiero et al 2019**), sono stati trascurati i dati che mostrano una differenza, calcolata rispetto ai tempi precedenti, di 1,5 m, 5 s e 30° rispettivamente per SWH, T_m e θ .

Poiché il dataset WAM non può essere validato sulle osservazioni delle boe, è stato effettuato il confronto WAM con ERA5 nel periodo 2009-2019.

6.2.1 Validazione dei dati provenienti da ERA5 rispetto alla Boa di Cetraro

E' stato confrontato SWH, Tm e θ calcolati da ERA5 con i dati di Cetraro (Figura 6-2 e Tabella 6-1). Sebbene un periodo di monitoraggio di 1-2 anni sia considerato adatto per validare un modello ondulatorio (Yang et al. 2019), è stato analizzato l'intero set di dati della boa di Cetraro (1999 - 2008).

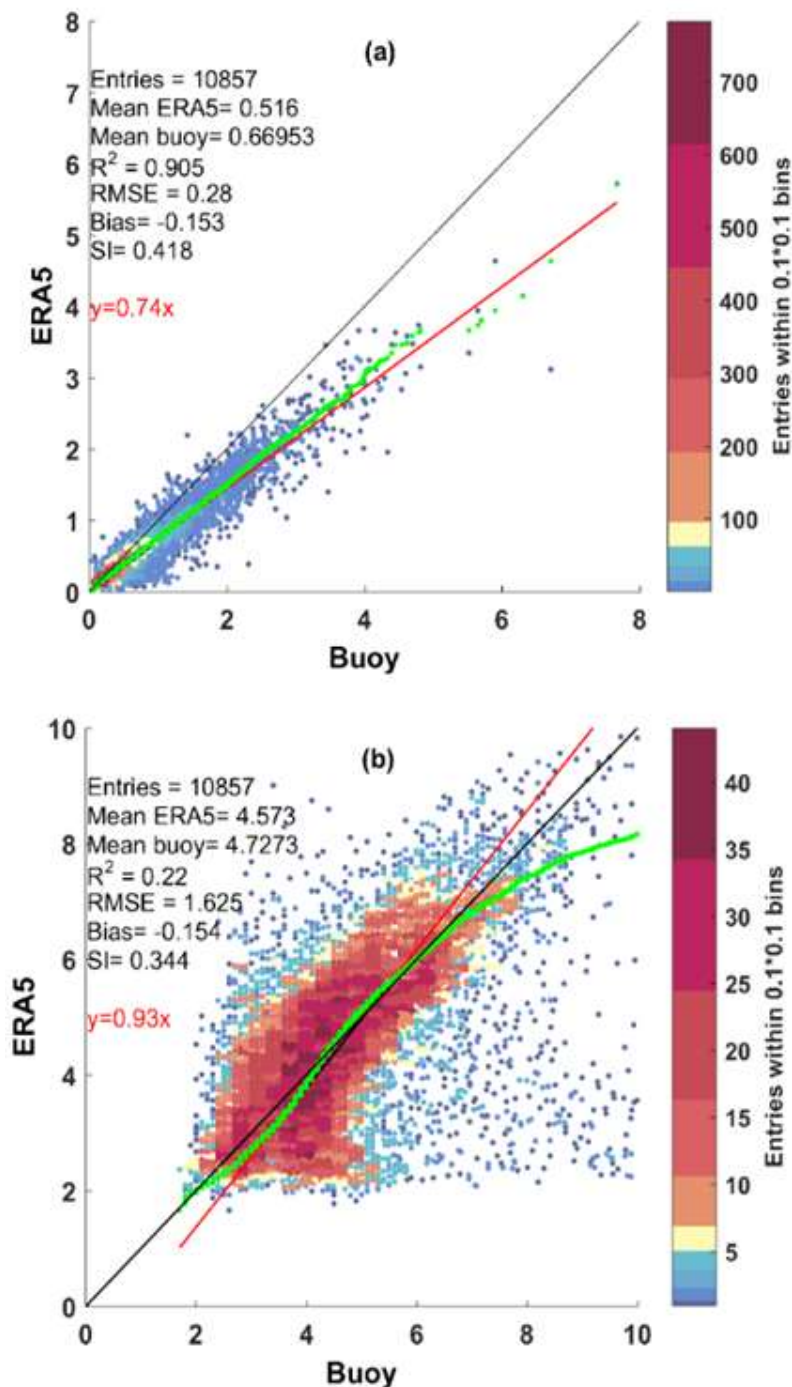


Figura 6-2. Dataset 27 febbraio 1999 - 5 aprile 2008, passo temporale di 6 ore. Confronto tra ERA5 e le osservazioni della boa di Cetraro. Scatter plot di SWH (a) e Tm (b). Le linee verdi rappresentano i diagrammi quantile-quantile, le linee nere le bisettrici, le linee rosse i best-fit dei minimi quadrati. (Lo Feudo et al. 2020d)

Tabella 6-1. Dataset 27 febbraio 1999 - 5 aprile 2008, passo temporale di 6 ore. Confronto tra ERA5 e i dati della boa (OBS) a Cetraro. Parametri statistici e metriche di errore per SWH, Tm e θ .

10858 dati	Altezza d'onda significativa SWH (m)		Periodo medio dell'onda Tm (s)		Direzione media dell'onda Θ (deg)	
	ERA5	OBS	ERA5	OBS	ERA5	OBS
Media	0.52 m	0.67 m	4.6 s	4.7 s	252 °	240 °
Varianza	0.22 m ²	0.40 m ²	2.1 s	2.4 s	//	//
Deviazione St.	0.47 m	0.63 m	1.5 s	1.5 s	//	//
Mediano	0.37 m	0.50 m	4.5 s	4.4 s	264 °	261 °
10th percentile	0.14 m	0.15 m	2.7 s	3.0 s	182 °	131 °
90th percentile	1.09 m	1.44 m	6.5 s	6.6 s	264 °	261 °
Massimo	5.72 m	7.67 m	10.7 s	10.4 s	//	//
BIAS	-0.15 m		-0.13 s		12 °	
MAE	0.18 m		0.96 s		35 °	
RMSE	0.28 m		1.47 s		67 °	
SI	0.40		0.31		0.3	
R²	0.80		0.91		0.7	

La Figura 5-2a mostra i diagrammi di dispersione quantile-quantile di SWH tra ERA5 e il dataset della boa di Cetraro. ERA5 sovrastima leggermente l'SWH per le onde piccole (< 0,6 m) e sottostima l'SWH in condizioni di mare forte, coerentemente con i parametri statistici e le metriche di errore riportati in Tab. 1. La correlazione tra l'ERA5 e i dati delle boe può essere espressa come una relazione lineare con 0,74 di pendenza. Questo è il risultato della diffusa limitazione dei modelli a bassa risoluzione nel riprodurre la mesoscala del clima dei venti superficiali, con particolare riferimento all'area mediterranea, dove l'altezza d'onda aumenta con la risoluzione del modello, come dimostrato da Cavaleri e Bertotti (2004).

Il confronto del periodo medio delle onde (Figura 5-2b e Tabella 5-1) mostra una generale sottostima delle onde più grandi. Alcune differenze si evidenziano anche nella direzione delle onde (Tabella 5-1), ma sono limitate alle onde piccole e sono principalmente causate dall'effetto del vento locale, che non viene riprodotto correttamente da ERA5.

6.2.2. Confronto ERA5 - WAM

I confronti di SWH e Tm tra ERA5 e WAM hindcast forniscono una relazione lineare con pendenza di quasi 0,9 e 1 rispettivamente (Figura 6-3 e Tabella 6-2). Poiché la pendenza della correlazione SWH è leggermente più alta se confrontata con la correlazione tra ERA5 e i dati delle boe, si può sostenere che WAM sottostimi meno le altezze d'onda. Una possibile spiegazione è la risoluzione più fine della griglia del modello WAM (5 km), coerentemente con Cavaleri e Bertotti (2004). Risultati simili si ottengono per Tm e θ (Tabella 6-2).

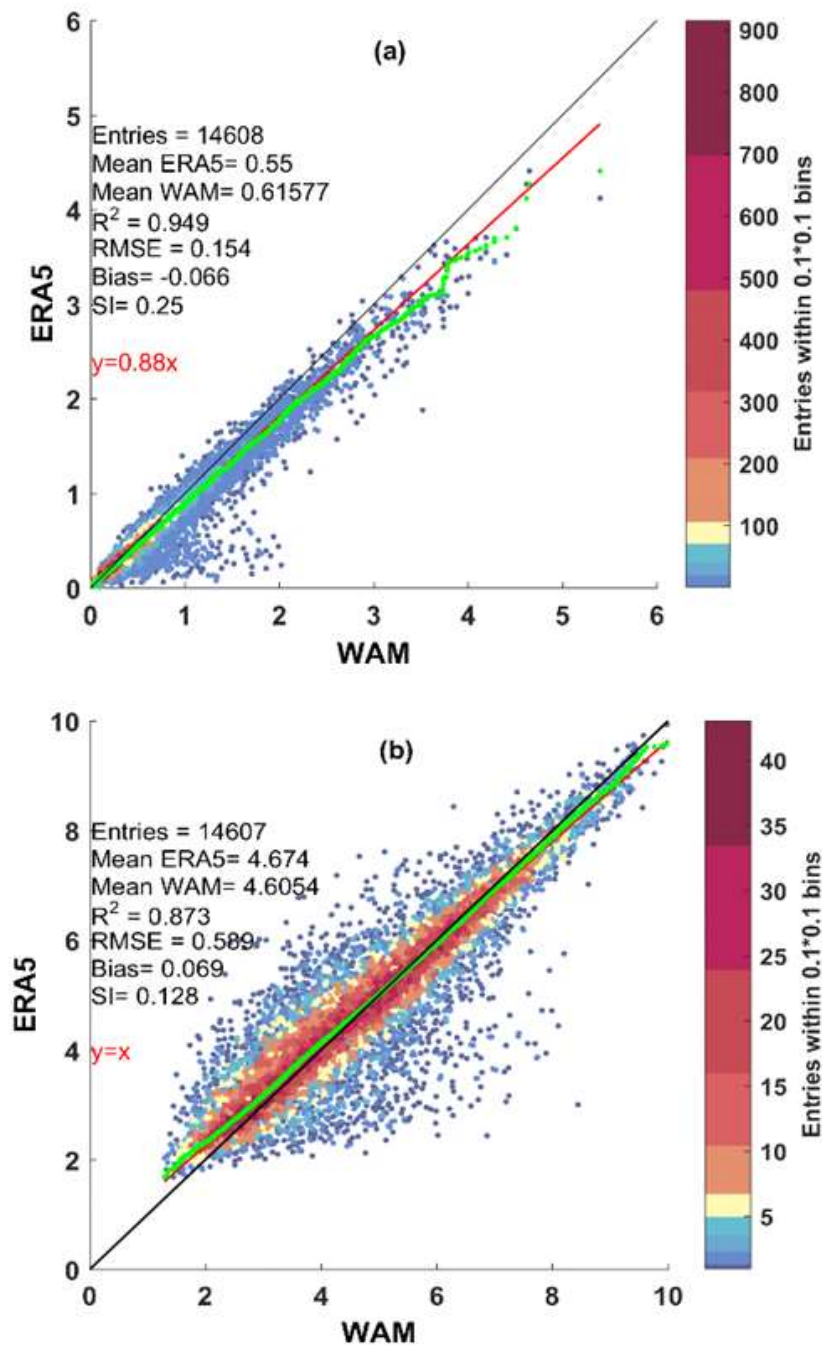


Figura 6-3. Dataset 27 febbraio 1999 - 5 aprile 2008, passo temporale di 6 ore. Confronto tra ERA5 e WAM hindcast a Cetraro. Scatter plot di SWH (a) e Tm (b). Le linee verdi rappresentano i diagrammi quantile-quantile, le linee nere le bisettrici, le linee rosse i best-fit dei minimi quadrati. (Lo Feudo et al. 2020d)

Tabella 6-2. Dataset 1 gennaio 2009 - 31 dicembre 2019, passo temporale di 6 ore. Confronto tra ERA5 e WAM a Cetraro. Parametri statistici e metriche di errore per SWH, Tm e θ .

<i>14163 dati</i>	Altezza d'onda significativa SWH (m)		Periodo medio dell'onda Tm (s)		Direzione media dell'onda Θ (deg)	
	ERA5	WAM	ERA5	WAM	ERA5	WAM
Media	0.55 m	0.62 m	4.7 s	4.6 s	254 °	253 °
Varianza	0.25 m	0.32 m	2.3 s	2.7 s	//	//
Deviazione St.	0.50 m	0.57 m	1.5 s	1.6 s	//	//
Mediano	0.38 m	0.43 m	4.5 s	4.5 s	266 °	270 °
10th percentile	0.14 m	0.16 m	2.8 s	2.6 s	188 °	176 °
90th percentile	1.17 m	1.31 m	6.8 s	6.8 s	289 °	296 °
Massimo	4.41 m	5.40 m	10.5 s	10,2s		//
BIAS	-0.07 m		0.07 s		1 °	
MAE	0.09 m		0.40 s		14 °	
RMSE	0.15 m		0.59 s		37 °	
SI	0.25		0.13		0.14	
R²	0.92		0.87		0.61	

6.2.3. Confronto ERA5 – WAM – Boa di Cetraro

Per confermare le migliori prestazioni del modello WAM, è stato confrontato il dataset hindcast SWH ERA5 (Fig. 6-4a) e WAM (Fig. 6-4b) con le osservazioni della boa di Cetraro (anno 2006). WAM mostra una migliore correlazione rispetto a ERA5.

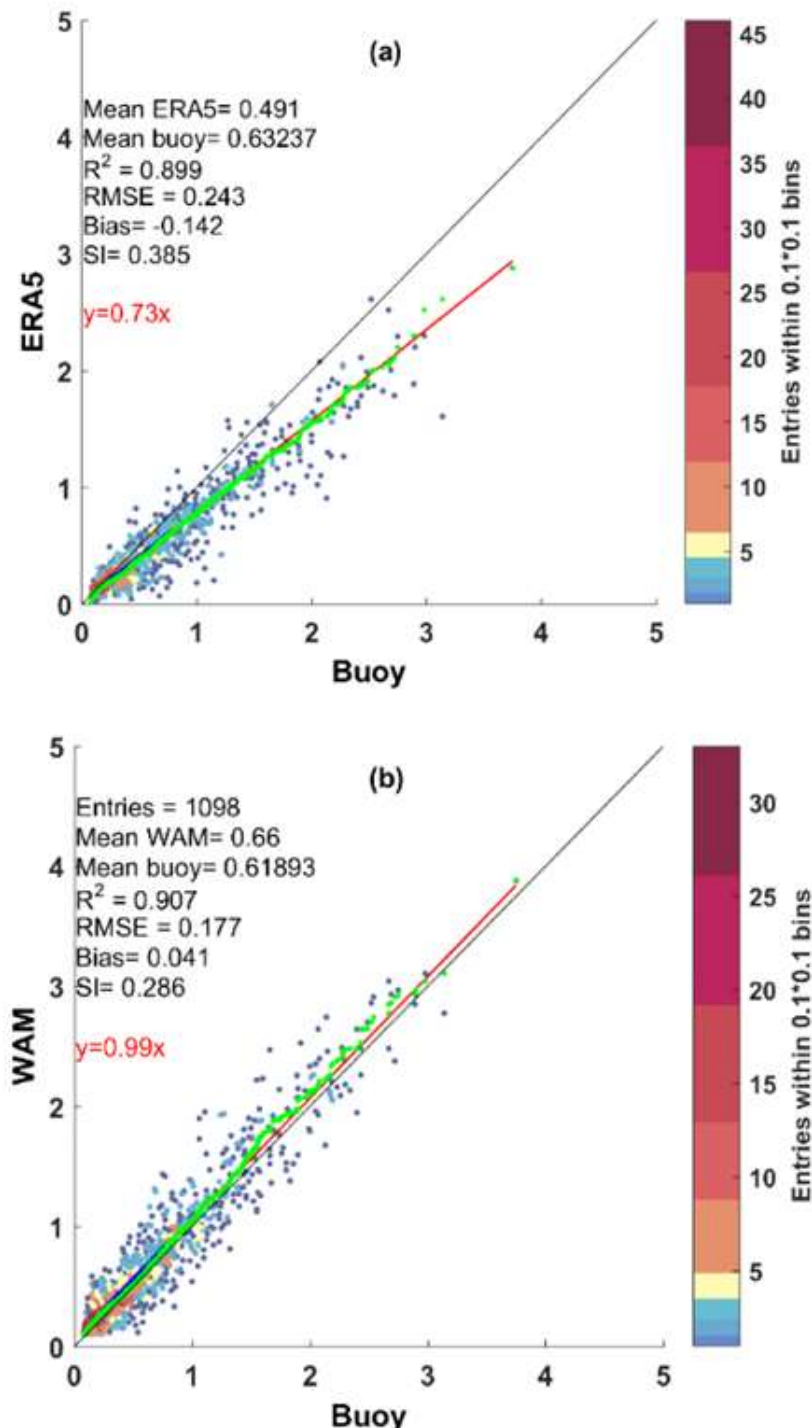


Figura 6-4. Dataset 1 gennaio 2006 - 31 dicembre 2006, passo temporale di 6 ore. Confronto dei dataset hindcast SWH ERA5 (a) e WAM (b) con i dati della boa di Cetraro. Le linee verdi rappresentano i grafici quantile-quantile, le linee nere le bisettrici, le linee rosse i best-fit dei minimi quadrati. (Lo Feudo et al. 2020d)

6.3 Caratterizzazione Meteorologica derivante dalle analisi

6.3.1 Climatologia del vento e delle onde off-shore

Le rose dei venti e delle onde della Fig. 6 illustrano la frequenza e i percentili relativi di W10, SWH e T_m del vento e delle onde provenienti da una certa direzione. L'analisi del dataset ERA5 fornisce una direzione media predominante dell'onda occidentale θ (Fig. 6-5b e 6-5c), in accordo con altri studi effettuati nel Tirreno meridionale (**Morucci et al. 2016; Caloiero et al. 2019**). I campi d'onda sono guidati dai regimi di vento di Maestrale-Etesiano e Scirocco-Libeccio (**Lionello et al. 2007**), come evidenziato in Fig. 6-5a. Tuttavia, a causa del fetch nullo nelle direzioni nord ed est della linea di costa di Belvedere Marittimo (cioè, da 345° N a 135° N, vedi Fig. 1), il 50% delle onde con SWH > 2 m corrisponde alla direzione WNW (270° N - 315° N) e il 50% a WSW (225° N - 270° N).

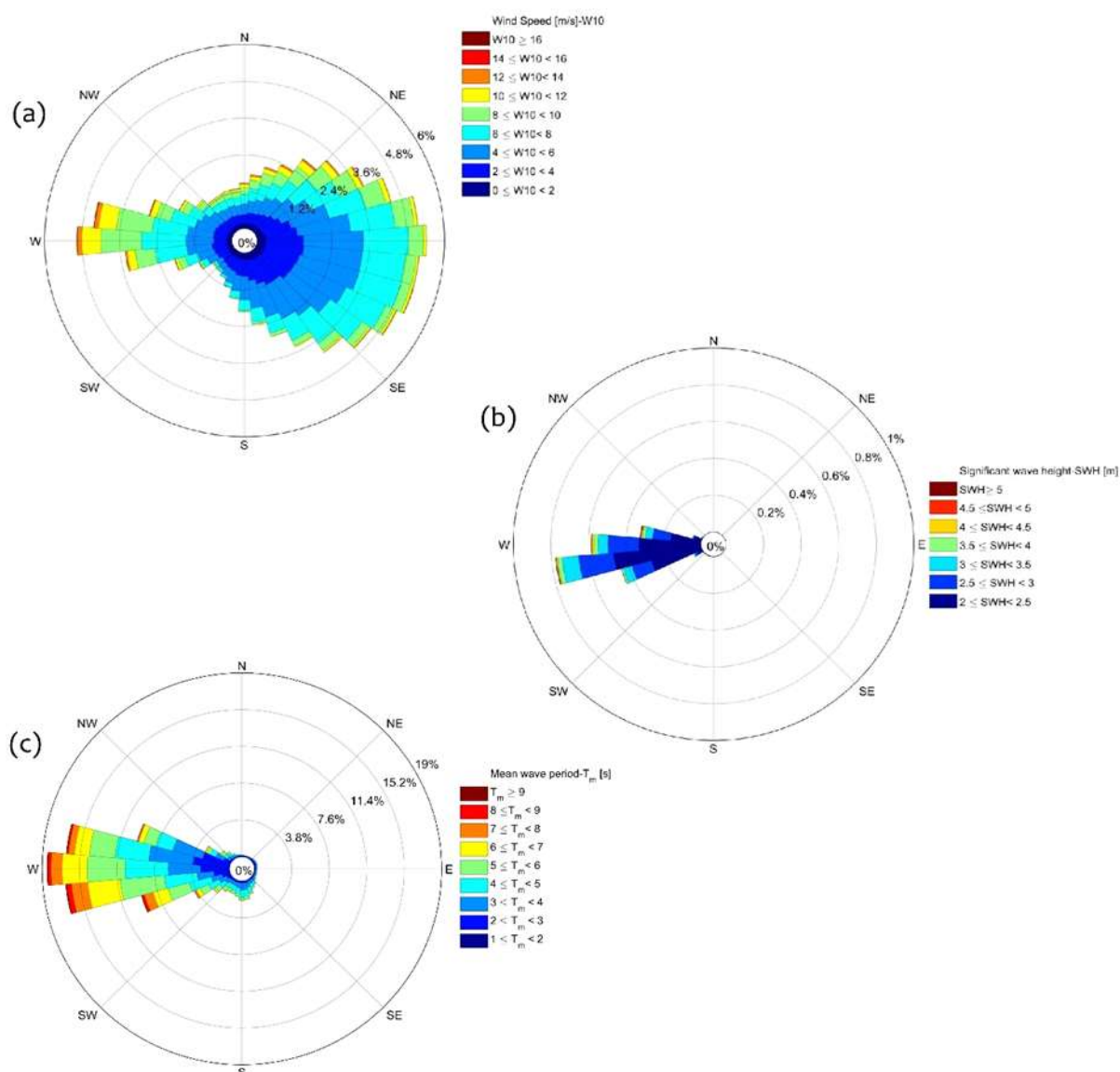


Figura 6-5. Dataset ERA5 1950-2019, passo temporale di 6 ore. **(a)** Rosa dei venti; **(b)** Rosa SWH; **(c)** Rosa T_m. (Lo Feudo et al. 2020d)

6.3.2 Variabilità stagionale

Il clima ondoso nel Tirreno meridionale mostra una significativa stagionalità (Caloiero et al. 2019), caratterizzata da un mare relativamente calmo nella stagione calda (da marzo ad agosto) e da un mare forte innescato dai venti di Maestrale e Libeccio durante la stagione fredda (da settembre a febbraio). La Figura 6-6 mostra la media mensile di SWH e HMAX (a), e di Tm e Tp (b) a Belvedere Marittimo, calcolata sulla base del dataset ERA5 di 70 anni.

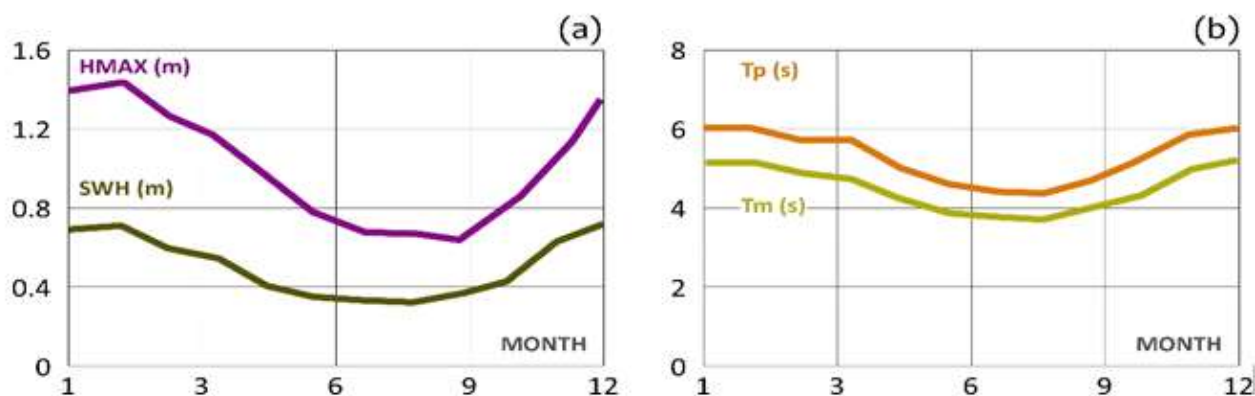


Figura 6-6., dataset ERA5 1950 - 2019, passo temporale di 6 ore. Media mensile di: (a) SWH (senape) e HMAX (viola); (b) Tm (giallo) e Tp (arancione). (Lo Feudo et al. 2020d)

La Figura 6-7 confronta la media stagionale (cioè le stagioni calde e fredde) di SWH (a) e Tm (b) con la media annuale, per ogni anno del dataset ERA5.

Le tabelle 6-3 e 6-4 riportano alcuni parametri statistici riferiti alle quattro stagioni definite secondo gli standard della World Meteorological Society per l'emisfero settentrionale: Inverno da dicembre a febbraio (DJF), Primavera da marzo a maggio (MAM), Estate da giugno ad agosto (JJA), Autunno da settembre a novembre (SON).

L'area del MESCT presenta una differenza significativa tra le quattro stagioni: il minimo di forzatura delle onde si verifica in estate, mentre in autunno e in primavera si nota un clima ondoso simile alla media annuale. Onde più alte e più lunghe caratterizzano la stagione fredda, quasi in tutti gli anni del periodo 1950-2019.

Tabella 6-3. Parametri statistici stagionali di SWH. La colonna di destra riporta la media annuale.

SWH	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
Media	0.71 m	0.52 m	0.33 m	0.48 m	0.51 m
Varianza	0.020 m ²	0.008 m ²	0.002 m ²	0.008 m ²	0.002 m ²
Deviazione St.	0.140 m	0.089 m	0.039 m	0.088 m	0.048 m
Mediana	0.70 m	0.53 m	0.34 m	0.47 m	0.51 m
10^{mo} percentile	0.53 m	0.40 m	0.29 m	0.37 m	0.45 m
90^{mo} percentile	0.88 m	0.62 m	0.38 m	0.58 m	0.56 m
Massimo	0.99 m	0.76 m	0.43 m	0.76 m	0.64 m

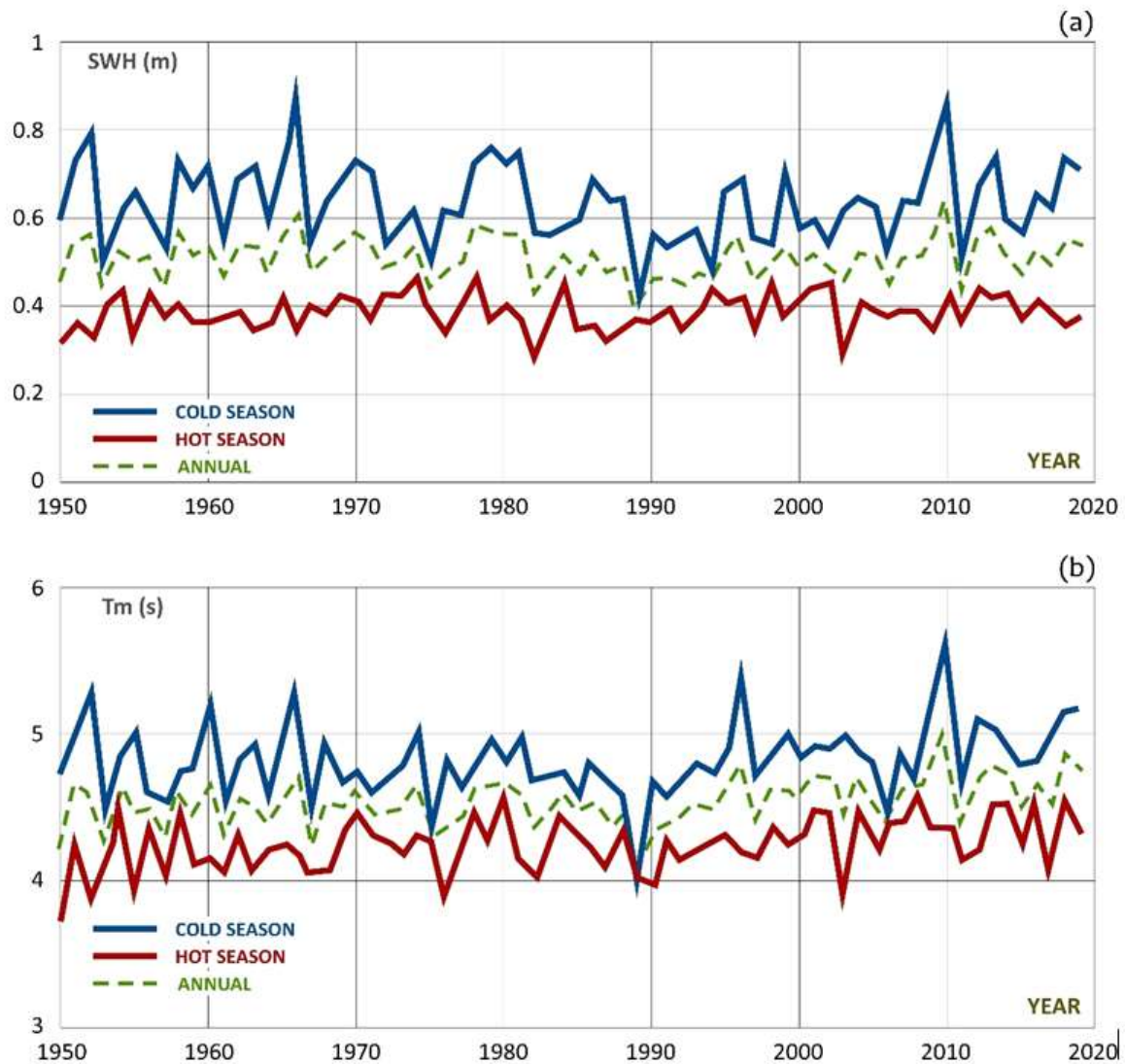


Figura 6-7. ERA5, set di dati 1950-2019. Stagioni fredde (blu) e calde (rosso): SWH (a) e Tm (b). Le linee verdi tratteggiate rappresentano le medie annuali. (Lo Feudo et al. 2020d)

Tabella 6-4. Parametri statistici stagionali di Tm. La colonna di destra riporta la media annuale.

<i>Tm</i>	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annuale
Media	5.20 s	4.65 s	3.83 s	4.43 s	4.52 s
Varianza	0.148 s ²	0.088 s ²	0.040 s ²	0.111 s ²	0.027 s ²
Deviazione St.	0.384 s	0.296 s	0.200 s	0.333 s	0.165 s
Mediano	5.27 s	4.67 s	3.84 s	4.41 s	4.51 s
10th percentile	4.73 s	4.22 s	3.62 s	4.04 s	4.31 s
90th percentile	5.66 s	5.06 s	4.03 s	4.92 s	4.73 s
Massimo	5.99 s	5.32 s	4.31 s	5.26 s	4.99 s

6.3.3 Analisi delle tendenze

La Figura 6-8, la Tabella 6-5 e la Tabella 6-6 riportano l'andamento annuale del clima ondoso (SWH e T_m) a Belvedere Marittimo, basato sui dati della rianalisi ERA5. La possibile tendenza monotona è stata analizzata calcolando il test non parametrico MK e lo stimatore SSE (Klein-Tank e Konnen 2003).

Nonostante i risultati mostrino un'ampia variabilità annuale di SWH e T_m , essi permettono di dedurre una leggera tendenza positiva solo per il periodo d'onda medio (significatività al 95%), secondo Caloiero et al. 2019. Il test MK è stato ulteriormente utilizzato per identificare possibili tendenze mensili e stagionali (Vitale et al. 2010), dove il livello di significatività del test (90%, 95% e 98%) è stato evidenziato rispettivamente con i colori verde, giallo e rosso (Tabella 5-5 e Tabella 5-6).

Alcuni mesi mostrano una tendenza di aumento del periodo d'onda, ma per lo più non significativa. Per quanto riguarda l'analisi stagionale, la primavera, l'autunno e l'estate mostrano una tendenza all'aumento di T_m significativa al 95%, 90% e 98% rispettivamente, mentre SWH presenta tendenze non significative. In inverno, sono state osservate tendenze non significative sia per SWH che per T_m .

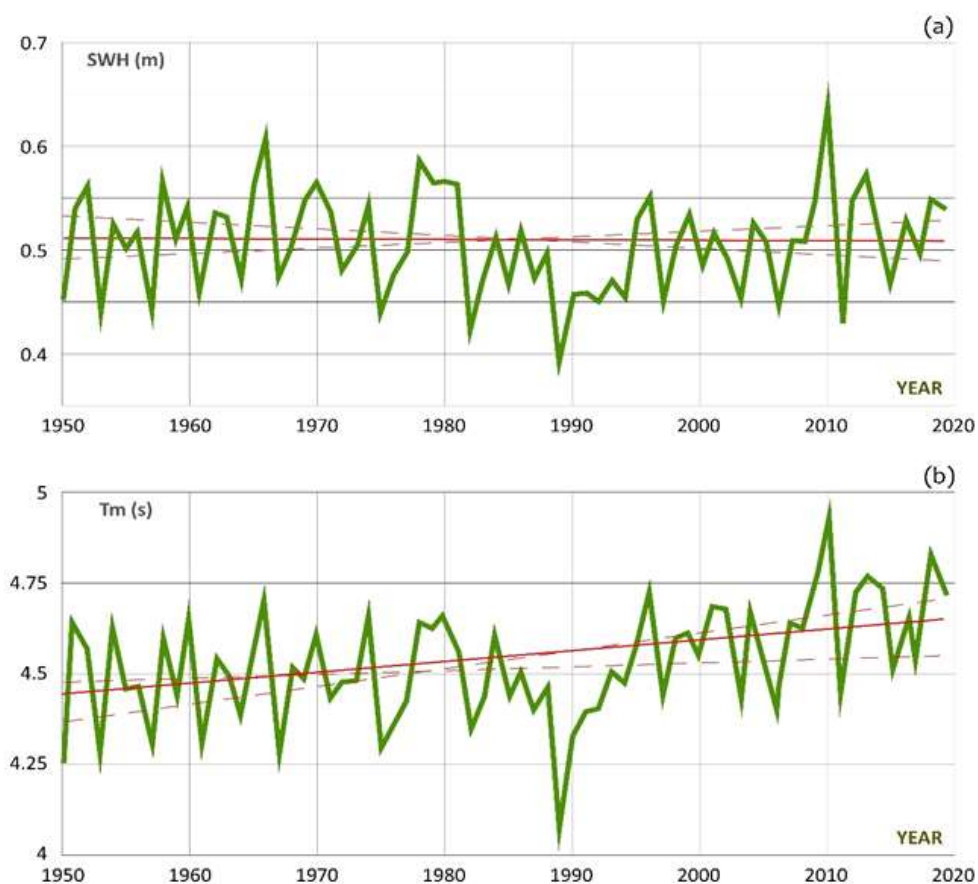


Figura 6-8. Serie di dati della rianalisi ERA5 1950-2019. Le linee verdi illustrano la media annuale di SWH (a) e T_m (b). I test MK e SSE al 95% di intervallo di confidenza sono rappresentati rispettivamente con linee rosse solide e tratteggiate. (Lo Feudo et al. 2020d)

Tabella 6-5. Analisi mensile, stagionale e annuale di SWH. Il trend MK è riportato nella seconda e terza colonna. I valori significativi sono identificati con "S", quelli non significativi con "//". Il livello di significatività del 90% è evidenziato in verde, il 95% in giallo, il 98% in rosso. La colonna di destra riporta lo stimatore di pendenza A di Sen.

Periodo	Test Z	Significato	A
Gennaio	0.1521	//	0.00030
Febbraio	-1.0443	//	-0.00154
Mar	1.1964	//	0.00142
Apr	-0.3650	//	-0.00025
Maggio	1.2624	//	0.00091
Giugno	0.4157	//	0.00017
Luglio	0.8314	//	0.00036
Agosto	-2.2104	S	-0.00087
Settembre	1.2978	//	0.00070
Ottobre	-0.5171	//	-0.00043
Nov	0.3853	//	0.00042
Dicembre	-0.4157	//	-0.00065
DJF	-0.96	//	-0.00067
MAM	1.38	//	0.00082
JJA	-0.67	//	-0.00018
FIGLIO	0.48	//	0.00030
ANNUALE	-0.13	//	-0.00005

Tabella 6-6. Analisi mensile, stagionale e annuale del Tm. Il trend della MK è riportato nella seconda e terza colonna. I valori significativi sono identificati con "S", quelli non significativi con "//". Il livello di significatività del 90% è evidenziato in verde, il 95% in giallo, il 98% in rosso. La colonna di destra riporta lo stimatore di pendenza A di Sen.

Periodo	Test Z	Significato	A
Gennaio	0.0406	//	0.00011
Febbraio	0.5779	//	0.00217
Mar	-0.1115	//	-0.00032
Apr	1.2066	//	0.00426
Maggio	1.3485	//	0.00373
Giugno	2.1293	S	0.00577
Luglio	1.8758	S	0.00421
Agosto	1.5108	//	0.00342
Settembre	-1.0342	//	-0.00186
Ottobre	2.4537	S	0.00620
Nov	0.9937	//	0.00407
Dicembre	1.4296	//	0.00443
DJF	0.06	//	0.00009
MAM	2.58	S	0.00473
JJA	1.65	S	0.00212
FIGLIO	3.02	S	0.00579
ANNUALE	3.10	S	0.00304

La Figura 6-9 illustra l'Innovative Trend Analysis (ITA), ampiamente applicata in idrologia (Sen, 2012; Haktanir e Citakoglu 2014). Sono stati confrontati due sottodati ERA5 (1950-1984, asse delle ascisse, e 1985-2019, asse delle ordinate) ordinati in ordine crescente. Sono state analizzate le tendenze medie annuali (verde), della stagione fredda (blu) e della stagione calda (rosso) per SWH e Tm. Le tendenze del test MK sono state confermate dall'ITA.

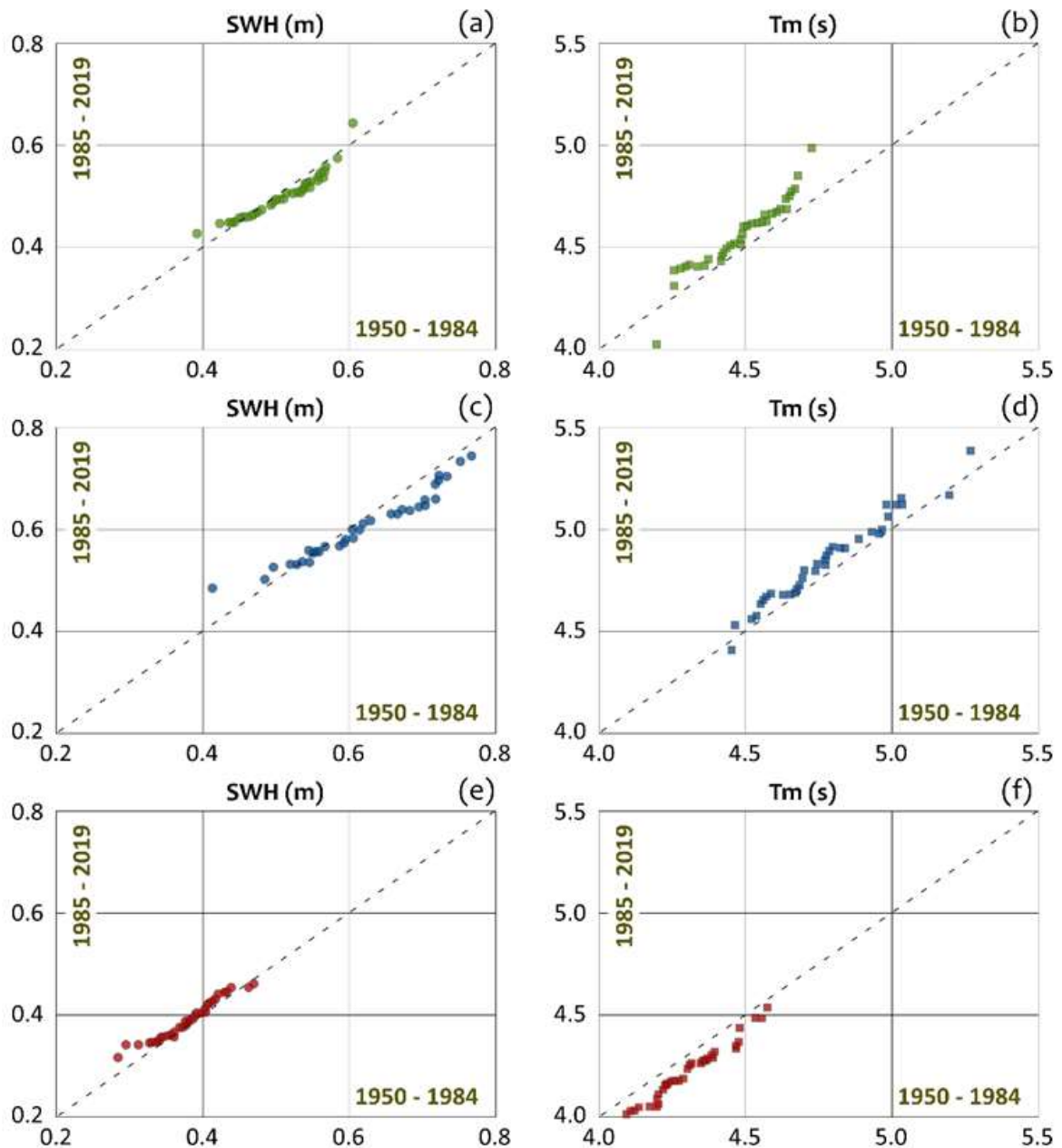


Figura 6-9. Set di dati della rianalisi ERA5 1950-2019. Metodo ITA per SHW (lato sinistro) e Tm (lato destro). Media annuale (verde, (a) e (b)); stagione fredda (blu, (c) e (d)); stagione calda (rosso, (e) e (f)). (Lo Feudo et al. 2020d)

7. Modellazione numerica ed analisi sintetiche degli effetti delle barriere soffolte sui fenomeni d'onda

Attraverso l'acquisizione dei dati che caratterizzano l'area di Belvedere è stato quindi possibile effettuare delle simulazioni relative all'idrodinamica costiera del caso studio di Calabaia.

In particolare nella prima fase di simulazioni di seguito descritta si è scelto di comprendere meglio gli effetti idrodinamici delle opere sommerse sul clima ondoso, l'applicabilità di questo tipo di opera a situazioni del territorio, ma anche di indagare al meglio il funzionamento e la durabilità dei ripascimenti protetti da barriere sommerse.

La modellazione 2D e 3D di strutture lunghe e strette come le barriere sommerse aumenta notevolmente lo sforzo computazionale per evitare l'instabilità del modello.

Purtroppo la scarsità di dati su opere simili e le poche simulazioni individuate in letteratura non permettono di fare delle analisi sullo spettro di applicabilità, principalmente perché gli interventi sono tarati rispetto alle caratteristiche dei vari siti.

Per questo motivo si è deciso di indagare, attraverso l'ausilio della modellazione numerica, la replicabilità e gli effetti delle barriere soffolte sotto l'azione di diverse forzanti, per meglio comprenderne i limiti e le potenzialità.

In questa parte di analisi è stato quindi individuato un metodo semplificato, basato sulla modellazione di elementi sommersi che sono di ostacolo alle onde per come implementati all'interno del modello MIKE21-FM.

Il modello di calcolo MIKE21-FM sfrutta l'implementazione della formula di Goda (Capitolo 4) direttamente sul dominio di calcolo, evitando la modellazione tridimensionale della barriera e riducendo la durata dei tempi di calcolo.

Approcci simili sono ampiamente implementati e documentati praticamente in tutti i modelli numerici disponibili in letteratura. Il principio di queste metodologie è quello di sfruttare una o più funzioni matematiche che fungono da collegamento specifico fra una cella del dominio e quella adiacente, per riprodurre gli effetti dovuti alla presenza di specifiche strutture o singolarità senza incidere pesantemente nei tempi di calcolo del sistema. Questi sistemi di semplificazione trovano ampio uso nel settore idraulico, per rappresentare diversi tipi di manufatti come scarichi (aggiunta di acqua nel dominio), pozzetti e caditoie (sottrazione di volume di acqua dal dominio) o ostacoli come barriere e argini (modifica specifica a delle componenti dell'equazione dell'energia o dei volumi) (Viero et al 2013 e 2019, Mel et al 2020).

Nello specifico caso in analisi lo scopo è quello di collegare due elementi della maglia di calcolo situati a monte ed a valle della barriera sommersa, attraverso

l'implementazione della formula di Goda (capitolo 4), ed individuando quindi una modifica del valore di altezza d'onda prima e dopo il manufatto stesso.

Nella prima fase delle analisi è stato quindi necessario calibrare il parametro β della formula di Goda.

Questo è stato fatto sfruttando il confronto con i risultati calcolati per mezzo del modello completo 2D (Figura 7-1), utilizzato in un range di diverse profondità della sua cresta (z) e diversi climi d'onda in ingresso come forzanti (H_{m0}).

Nelle simulazioni effettuate con il modello 2D completo, abbiamo riprodotto la barriera longitudinale rigida sommersa per mezzo di variazioni altimetriche del fondo in alcuni elementi della griglia 2D (Figura 7-1).

L'idrodinamica della barriera è risolta dai moduli idraulico e spettrale delle onde (Capitolo 4), senza alcuna variazione dell'altezza del fondale, disabilitando l'uso del modello sedimentologico.

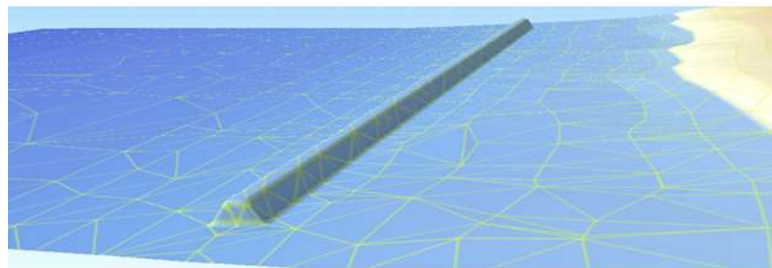


Figura 7-1. Modellazione 2D completa della barriera soffolta. (da Maiolo et al. 2020)

L'introduzione della barriera come elemento che fa variare la quota del fondale di specifici elementi della griglia ha permesso di valutare gli effetti di un manufatto sommerso senza dover impostare particolari formulazioni di funzionamento, rendendolo quindi un elemento di confronto per le simulazioni semplificate attraverso la formulazione di Goda.

Le simulazioni semplificate d'altronde consentono di valutare l'effetto della barriera sommersa riproducendone gli effetti attraverso una funzione matematica che collega gli elementi del reticolo situati prima e dopo la barriera, che funziona come una singolarità presente sul dominio, sul cui bordo viene applicata l'equazione di Goda (Figura 7-2).

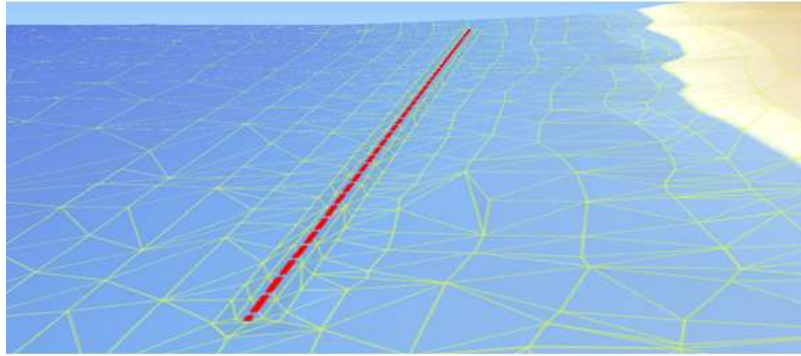


Figura 7-2. Modellazione 2D semplificata della barriera soffolta. La linea rossa rappresenta il bordo degli elementi lungo i quali viene applicata la formulazione di Goda, e che rende gli effetti equivalenti alla modellazione completa, ma riducendone i tempi di calcolo (da Maiolo et al. 2020)

Il confronto tra le simulazioni effettuate mediante la modellazione 2D completa e lo schema semplificato ha consentito di individuare il valore ottimale di β della formula di Goda che meglio riproduce gli effetti delle barriere soffolte sullo smorzamento delle onde rispetto alle caratteristiche del sito di Calabaia.

I risultati della metodologia semplificata sono stati poi sintetizzati in due diverse formulazioni, che mirano a mettere in relazione lo smorzamento delle onde solo con la profondità della cresta della barriera e con il clima d'onda, senza effettuare alcuna simulazione mediante i modelli.

7.1 Impostazione del modello per le analisi di tipo sintetico

Volendo indagare gli effetti generici delle barriere sommerse, in questo tipo di analisi è stato scelto un dominio da inserire nel modello di calcolo di tipo semplificato, composto da una maglia non strutturata, con triangoli di dimensioni non omogenee, più grandi al largo e più piccoli vicino alla barriera e alla linea di costa, al fine di rappresentare più in dettaglio l'area di interesse (Figura 7-3).

Come si può evincere dalla regolarità della pendenza, non è stato preso in considerazione il riporto di materiale dovuto al ripascimento, ma è stata modellata una spiaggia con pendenza costante, per evitare la sovrapposizione di effetti dissipativi dovuti al Run-Up, mentre l'affondamento della cresta della barriera simulata è stata impostata pari a 2,5 metri, come nel caso studio.

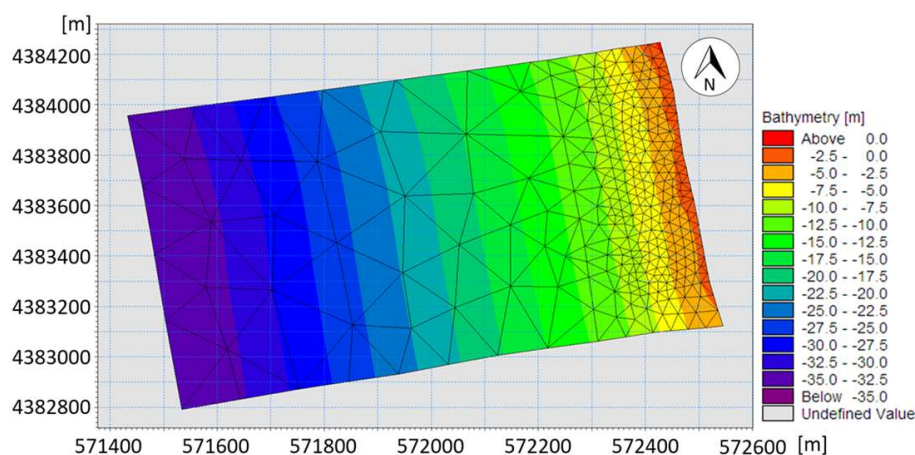


Figura 7-3. Griglia del modello idrodinamico utilizzato in questo studio. I diversi colori si riferiscono alle diverse quote del letto. La scala metrica si riferisce a WGS84 UTM 33N, EPSG-32633. (da Maiolo et al. 2020)

La forzante d'onda è stata imposta sul lato ovest del dominio. I lati nord e sud della griglia sono caratterizzati da *condizioni al contorno laterali* (Orlanski 1976, Chapman 1985, Shabangu 2015), indicate nel manuale di configurazione come *buona approssimazione quando la linea di confine è quasi rettilinea e quando i contorni della profondità sono quasi perpendicolari alla linea* (DHI 2017).

Il lato est della maglia, invece, ha la condizione di *terra* imposta nel generatore di maglia MIKE. Per ogni simulazione sintetica, sul bordo ovest abbiamo impostato una condizione di formazione graduale delle onde offshore, ottenendo una crescita lineare dell'altezza d'onda significativa fino al valore che si voleva simulare, al fine di evitare picchi di energia d'onda che genererebbero instabilità del modello.

Una volta raggiunta l'altezza d'onda desiderata, inizia la registrazione dei dati, con una durata di 24 ore e un passo di salvataggio dei dati di 600 secondi, per un totale di 144 dati di output per ciascuna simulazione. Per ogni esecuzione, consideriamo la forzante come un'onda costante (nel tempo e nello spazio), impostando il modello d'onda come una *formulazione quasi stazionaria*, adatta a coste non più lunghe di 10 km (DHI 2017).

7.2 Analisi dei dati derivati dalle simulazioni di tipo sintetico

Sono state quindi simulate le efficienze di smorzamento della barriera sommersa per cinque diverse onde offshore (Tabella 7-1).

Tabella 4-1. Altezze e periodi delle onde simulate.

H_{in} [m]	3	4	5	6	7
T_p [s]	9.18	10.60	9.18	11.85	14.02

Come esposto nel paragrafo precedente, una prima serie di simulazioni è stata effettuata rappresentando la barriera soffolta mediante la modellazione 2D completa.

Gli effetti della barriera sono stati ulteriormente valutati mediante una seconda serie di simulazioni effettuate applicando l'approccio semplificato mediante la formula di Goda invece della modellazione 2D della barriera.

Utilizzando le stesse condizioni al contorno, sono stati testati cinque valori di β con l'obiettivo di ottenere gli stessi risultati calcolati attraverso la modellazione 2D completa.

In tutti i casi esaminati, sia di modello completo che di formulazione semplificata, gli effetti di decadimento energetico sono stati analizzati lungo una sezione trasversale passante per la sezione centrale della barriera sommersa.

Al fine di effettuare in maniera omogenea le valutazioni di decadimento energetico dovuto alla barriera, sulla sezione di controllo lunga 120 metri sono stati presi in considerazione i valori di altezza significativa 60 metri prima (punto $H_{m0\ in}$) e 60 metri dopo l'opera stessa (punto $H_{m0\ out}$), valutati su tutti e 144 i dati di output attraverso la media del valore di altezza significativa registrato nel corso della simulazione nello specifico punto (in Figura 7-3 l'esempio relativo ad una altezza significativa a largo di 5 metri).

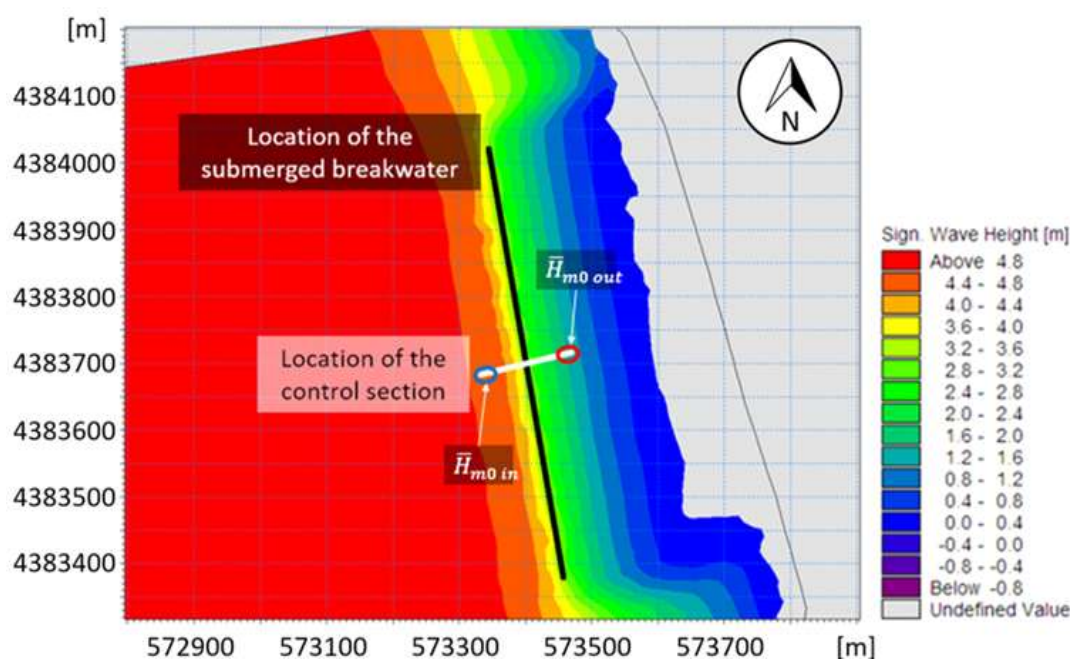


Figura 7-3. Calcolo del clima ondoso mediante la simulazione semplificata con $H_{m0} = 5m$. La linea bianca rappresenta la posizione della sezione di controllo, evidenziano la sezione utilizzate per calcolare l'efficienza di decadimento e i due punti di controllo. La scala metrica si riferisce a WGS84 UTM 33N, EPSG-32633. (da Maiolo et al. 2020)

I risultati mostrano che la modellazione 2D semplificata è in grado di riprodurre lo smorzamento dell'altezza d'onda.

A questo punto al fine di individuare il valore di β che meglio riproduce l'effetto della barriera, abbiamo confrontato la frazione dell'altezza d'onda smorzata dalla barriera per tutte le onde di input riportate nella Tabella 1 (Figura 7-4).

L'efficienza di decadimento dell'altezza E_h è definita impostando l'altezza dell'onda significativa al largo come la media dei primi 25 m della sezione di controllo e l'altezza dell'onda significativa in uscita (come media degli ultimi 25 m della sezione di controllo) (Figura 7-3, linea bianca):

$$E_h = \frac{\bar{H}_{m0\ in} - \bar{H}_{m0\ out}}{\bar{H}_{m0\ in}}$$

In particolare si evidenzia la sovrapposizione del decadimento dell'altezza dell'onda dovuta alla simulazione del manufatto tramite formula di Goda (efficienza dell'altezza E_h) lungo la sezione trasversale della barriera sommersa con la simulazione completa.

Sulle ascisse sono riportate le altezze simulate in ingresso al modello, ed in ordinata è individuata la percentuale di decadimento relativa all'opera (Figura 7-4).

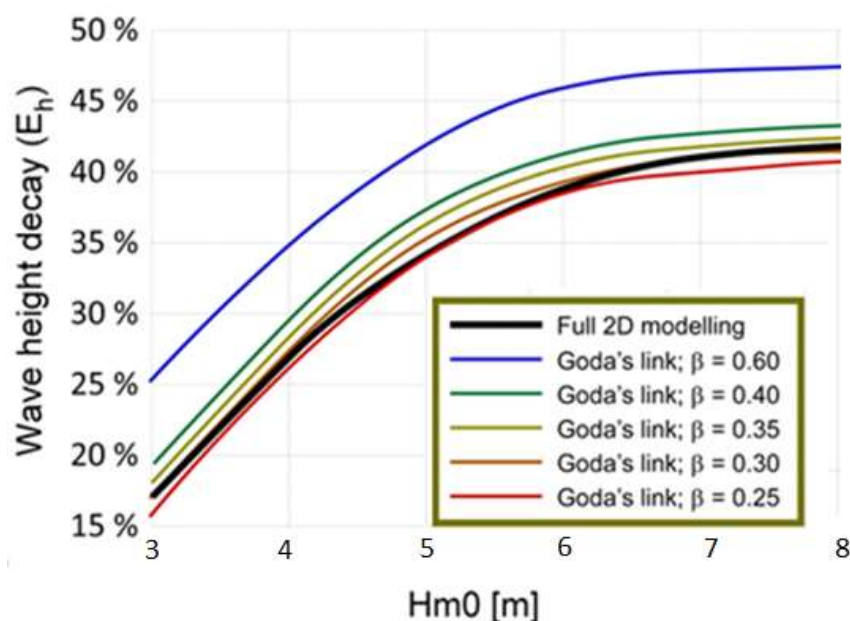


Figura 7-4. Efficienza di decadimento per differenti valori di H_{m0} in base alla formula di Goda ed al modello completo (linea nera). (da Maiolo et al. 2020)

Da qui è facile comprendere come il coefficiente β che meglio rappresenta gli effetti della barriera soffolta è 0,30. La Tabella 7-2 confronta l'errore quadratico medio tra i risultati delle due diverse serie di simulazioni, confermando il valore ottimale per il parametro pari a 0,30.

Tabella 7-2. Errore RMS dello smorzamento dell'altezza d'onda calcolato attraverso la modellazione 2D semplificata rispetto ai risultati ottenuti con il modello 2D completo.

Hm0	Modello 2D completo	Valori beta				
		0,25	0.3	0.35	0.4	0.6
3	17.06	15.81	16.98	18.10	19.45	25.29
4	31.22	30.71	31.98	33.11	34.29	38.88
5	38.96	38.29	39.35	40.36	41.26	46.00
6	41.25	40.17	40.98	41.89	42.82	47.05
7	41.75	40.89	41.70	42.56	43.46	47.55
Errore RMS		0.908	0.404	1.23	2.27	6.97

Per meglio comprendere gli effetti delle diverse simulazioni nella Figura 7-5 sono riportate e confrontate le progressive variazioni lungo tutta la sezione di controllo, dalla quale si può derivare l'effetto di dissipazione dell'energia d'onda, e quindi l'efficienza dello smorzamento, come variazione dell'ordinata, dell'altezza d'onda prodotta dalla barriera soffolta lungo la sezione di controllo, calcolato mediante la modellazione 2D completa e l'approccio 2D semplificato, con le onde entranti H_{in} di 3 m, 5 m e 7 m (Tabella 4-1) come condizioni al contorno. (Figura 7-4).

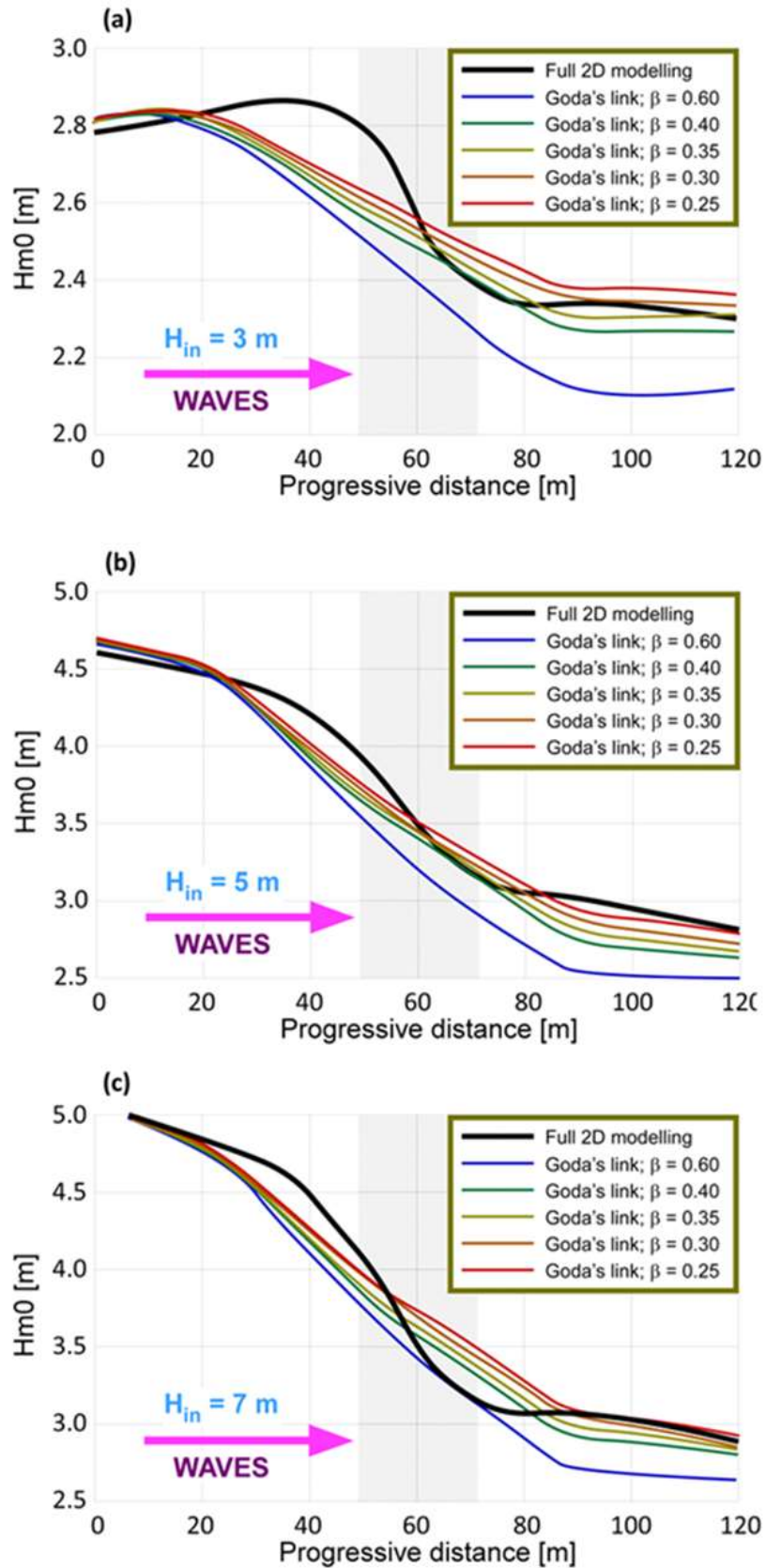


Figura 7-5. Decadimento dell'altezza dell'onda (efficienza dell'altezza E_h) lungo la sezione trasversale della barriera sommersa. (a) $H_{in} = 3\text{ m}$, (b) $H_{in} = 5\text{ m}$, (c) $H_{in} = 7\text{ m}$. (d). Efficienza di decadimento per differenti valori di H_{m0} . (da Maiolo et al. 2020)

L'efficienza di smorzamento è stata ulteriormente indagata utilizzando diverse profondità della cresta della barriera soffolta z , comprese tra -1 e -2,5 m, al fine di fornire un risultato più generale (Maiolo et al. 2020b).

La Figura 7-6 illustra la relazione logaritmica tra l'efficienza di smorzamento dell'altezza e della potenza e l'altezza dell'onda normalizzata alla profondità della cresta della barriera soffolta $\frac{Hm0}{z}$. Abbiamo selezionato un intervallo $\frac{Hm0}{z}$ che varia da 0,5 (cioè la barriera soffolta inizia a influenzare le onde) a 3,0, che è il limite vincolato dalla profondità della barriera, oltre il quale non ha più senso indagarlo.

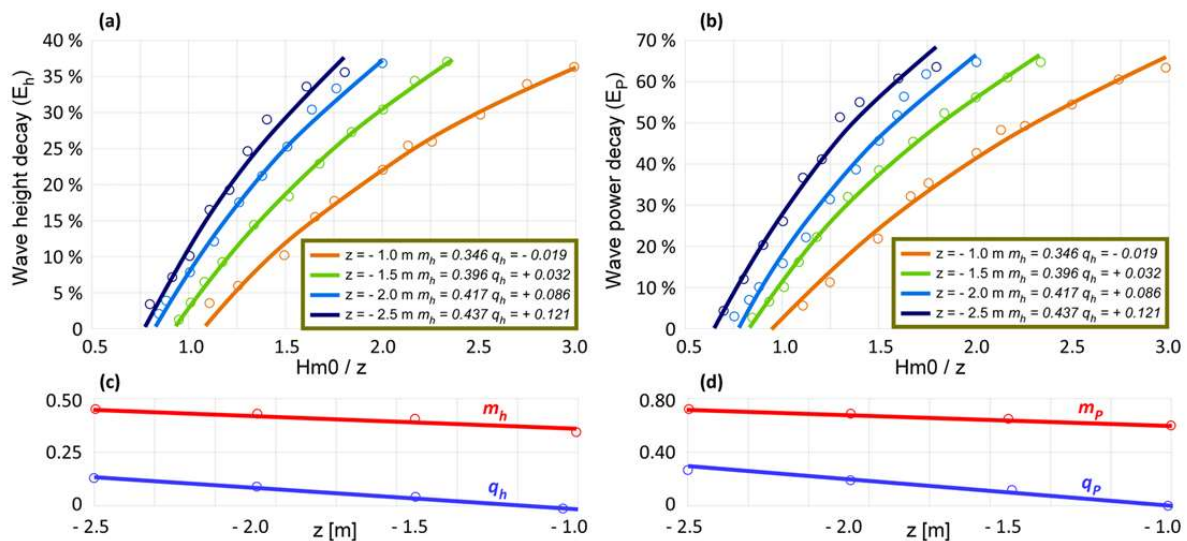


Figura 7-6. Efficienza di smorzamento dell'onda per diversi valori del rapporto $\frac{Hm0}{z}$. (a) Decadimento dell'altezza dell'onda, (b) decadimento della potenza dell'onda. (c) e (d) mostrano la relazione tra il valore dei parametri della relazione logaritmica e la profondità della cresta della barriera soffolta. (da Maiolo et al. 2020)

I parametri regressivi m e q possono essere ulteriormente correlati alla profondità del colmo z , mostrando una relazione lineare (Figura 7-6c e Figura 7-6d) e consentendo di mettere in relazione l'efficienza di smorzamento solo con il clima d'onda e la profondità della cresta della barriera, senza effettuare alcuna simulazione:

Equazioni per il calcolo dell'efficienza nel decadimento dell'altezza d'onda

$$E_h = m_h \cdot \ln\left(\frac{Hm0}{z}\right) + q_h$$

$$m_h = -0.599 \cdot z + 0.294$$

$$q_h = -0.0958 \cdot z - 0.112$$

Equazioni per il calcolo dell'efficienza nel decadimento della potenza d'onda

$$E_p = m_p \cdot \ln\left(\frac{Hm0}{z}\right) + q_p$$

$$m_p = -0.0866 \cdot z + 0.513$$

$$q_p = -0.1918 \cdot z - 0.180$$

I nostri risultati mostrano che la formulazione semplificata da noi proposta può supportare con successo le parti interessate nel fornire una prima valutazione dell'efficacia della barriera soffolta, con particolare riferimento alla sua progettazione e alle ulteriori misure di manutenzione.

I risultati possono avere una validità generale, poiché nell'area interessata non vi sono altre strutture che possano influenzare significativamente i risultati, poiché la batimetria utilizzata in queste simulazioni è una pendenza costante di spiaggia, e non è stato preso in considerazione il ripascimento a tergo della barriera.

A conferma ulteriore, gli intervalli di smorzamento delle onde che abbiamo riscontrato rientrano nell'intervallo di variabilità fornito in letteratura (**Hur et al 2019, Goda e Ahrens 2009**), pari sempre ad un massimo teorico del 38-40%, sia in riferimento all'altezza dell'onda che alla potenza dell'onda, dimostrando che l'efficienza della barriera soffolta è funzione della sommergezza relativa della cresta.

7.3 Simulazione di perdita di materiale dal ripascimento di Calabaia

Ad ulteriore comprensione degli effetti delle barriere sommerse, è stata applicata la modellazione 2D semplificata per valutare l'efficacia della barriera soffolta situata nella spiaggia di Calabaia attraverso la valutazione del processo di erosione che interessa la linea di riva.

Utilizzando le stesse condizioni ai bordi illustrate precedentemente, abbiamo utilizzato il modello per riprodurre il processo di erosione che interessa il ripascimento della spiaggia di Calabaia (Figura 7-7). Poiché l'area è stata soggetta a un grande volume di ripascimento, abbiamo simulato un solo strato erodibile, caratterizzato da una granulometria omogenea del materiale.

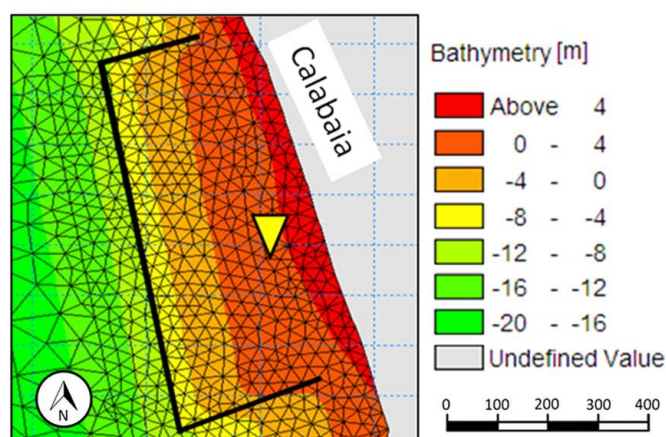


Figura 7-7. Dettaglio del dominio del modello utilizzato per valutare il processo di erosione della spiaggia di Calabaia. (da Maiolo et al. 2020)

Sono state simulate onde di ingresso con un periodo di ritorno di 200 e 50 anni rispettivamente, e due eventi ordinari, con frequenza mensile e giornaliera (Tabella 7-3):

Tabella 7-3. Caratteristiche dell'evento simulato per l'analisi della perdita di materiale.

H simulata _{m0} [m]	Durata dell'evento [h]	Periodo di picco [s]	Direzione dell'onda [deg]
7.20	8	14.02	270
5.00	16	11.85	270
2.00	32	7.49	270
0.25	6 mesi	2.65	270

Le analisi mostrano una significativa perdita di materiale dal ripascimento, con un carico di fondo dalla cella protetta verso il largo (Figura 4-11).

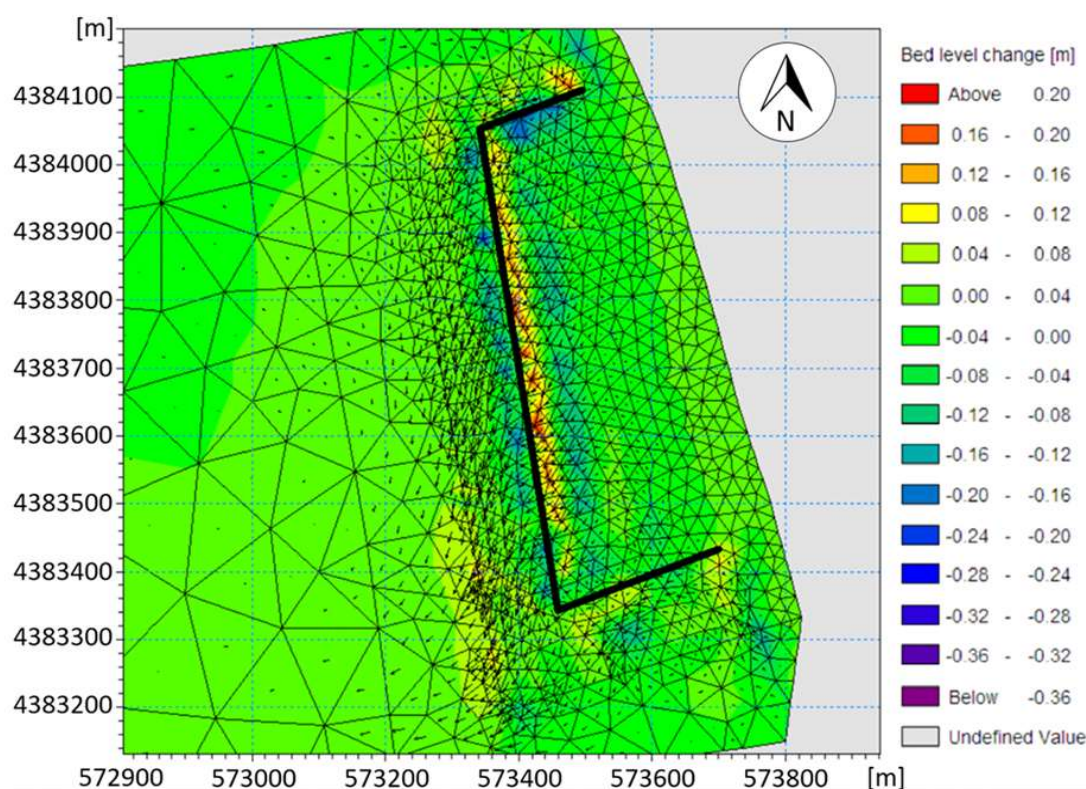


Figura 7-8. Variazione del livello del fondale e flusso di sedimenti per un evento con periodo di ritorno di 50 anni, simulato con la presenza della diga foranea. La scala metrica si riferisce a WGS84 UTM 33N, EPSG-32633. (da Maiolo et al. 2020)

Per valutare l'entità dell'erosione, è stata eseguita un'analisi quantitativa del materiale eroso basata sulla variazione di quota di ciascun elemento della griglia situato all'interno dell'area di ripascimento, moltiplicata per il valore della sua area .

I dati aggregati rendono conto del processo di erosione all'interno dell'evento (Tabella 4-4).

Tabella 4-4. Riepilogo dei dati sulla perdita di materiale.

H_{m0}	Durata dell'evento [ore]	Tempo di ritorno [anni]	Con barriera		Senza barriera		Rapporto di perdita
			Perdita di volume [m ³]	Perdita media di quota [cm]	Perdita di volume [m ³]	Perdita media di quota [cm]	
7.20	8	200	-629.40	-0.058	-25245.93	-11.4	40.11
5.00	16	50	-563.94	-0.045	-21671.71	-10.1	38.43
2.00	32	0.1	-1681.02	-0.59	-10910.4	-5.02	6.49
0.25	6 mesi	0.03	-700.29	-0.798	-13307.92	-6.55	19.00

I risultati indicano che, con la barriera soffolta, 6 mesi di azione ondosa ordinaria producono una perdita di volume di 700 m³, paragonabile a un singolo evento con tempo di ritorno di 200 anni, che produce una perdita di 629 m³. Le barriere sommerse non sono generalmente adatte a contrastare il processo erosivo prodotto da eventi ordinari, richiedendo misure complementari. A seconda della durata e dell'entità dell'evento, il ripascimento viene ampiamente eroso senza la protezione di una barriera soffolta, con una perdita di materiale da 6 a 40 volte rispetto alla configurazione protetta.

8. Modellazione numerica e analisi degli eventi estremi che caratterizzano il paraggio Diamante-Bonifati

Il Mar Mediterraneo è una regione hot-spot per i cambiamenti climatici (**Scarascia e Lionello 2013; Pranzini et al. 2015**), in quanto presenta un'ampia variabilità stagionale di temperatura, precipitazioni, vento e un aumento dell'occorrenza di cicloni locali (**Pytharoulis et al. 1996; Davolio et al. 2009; Miglietta et al, 2013**). Molti studi condotti nel Mar Mediterraneo si occupano del clima ondoso regionale (**Lionello e Sanna 2005; Galanis et al., 2012; Pomaro et al. 2017; Caloiero et al. 2019; Caloiero et al. 2020**), evidenziando l'importanza dell'effetto serbatoio di calore (**Trigo et al. 2002**) durante la stagione fredda, quando significativi gradienti di temperatura tra le masse d'aria settentrionali e la superficie del mare aumentano la frequenza e l'intensità dei sistemi ciclonici. Inoltre, la complessa orografia del bacino influenza le strutture sinottiche aumentando la velocità del vento locale.

Questo genera la presenza di mareggiate di breve durata ma molto violente, che non di rado si sono abbattute sul territorio di Belvedere Marittimo, con importanti effetti negli ultimi anni.

Le tempeste estreme possono danneggiare le strutture ingegneristiche costiere e offshore (**Gippius e Myslenkov 2020**), influenzando la morfologia della linea di riva, il trasporto dei sedimenti e le correnti di erosione. Pertanto, una conoscenza approfondita del clima locale vento-onda, insieme alla valutazione dei possibili effetti del cambiamento climatico, è fondamentale per limitare l'impatto dei rischi marini, per ripristinare gli ecosistemi costieri e per sfruttare appieno le risorse marine (**Booij et al. 1999; Campos et al. 2018**).

Come già accennato nei capitoli precedenti, la modellazione matematica è di conseguenza un supporto fondamentale per analizzare il clima ondoso offshore e inshore, l'idrodinamica costiera e i processi di erosione in oceani, litorali, lagune ed estuari, nonché i possibili effetti dei cambiamenti climatici (**Mulligan et al. 2008; Gedan et al. 2009; Liqueste et al. 2013; Mel et al. 2013; Nayak et al. 2013; Mel e Lionello 2014; Bondoni et al. 2016; Albarakati e Aboobacker 2018; Finotello et al. 2020; Mel et al. 2021b**).

8.1 La mareggiata del 21 marzo 2018

Si è quindi deciso di studiare come il clima delle onde sottocosta sia influenzato dalla complessa morfologia della linea di costa, utilizzando i dati provenienti dalle analisi sin qui condotte al fine di comporre una modellazione completa di eventi gravosi in termini di forzante e durata, a partire dal campo di vento fino a giungere alla dinamica costiera.

In questa fase le simulazioni numeriche sono state effettuate utilizzando il modello MIKE, che riproduce la crescita, il frangimento e la trasformazione delle onde di mare morto e di mare vivo (**Danish Hydraulics Institute, 2007**).

L'analisi di sensibilità della risoluzione spaziale e temporale, nonché dei confini del dominio del modello, è stata effettuata per identificare la risoluzione, l'estensione, le prestazioni e il consumo di tempo ottimali.

Il dominio del modello ha compreso questa volta tutta l'area del paraggio all'interno del quale ricade il comune di Belvedere Marittimo (vedi capitolo 5), chiusa a 4 km a nord di Diamante, 4 km a sud di Capo Bonifati e 5 km verso il mare. La maglia di calcolo è stata costituita da circa 1.200 nodi e 2.500 elementi triangolari di dimensione caratteristica (lunghezza del lato) di quasi 500 m al bordo (Figura 8-1b). Elementi più piccoli (200 m) descrivono l'area da Capo Tirone a Calabaia e le sezioni in cui abbiamo studiato l'idoneità del posizionamento di una nuova boa di monitoraggio (Figura 8-1c).

MIKE è stato forzato imponendo:

- (i) SWH (acronimo di *Significative Wave Height*, altezza significativa d'onda) alla sezione limite verso il mare (SBS, acronimo di *Sea Border Section*) calcolato dal WAM ogni 60 minuti alle sezioni di uscita (pallini gialli in figura 8-1a);
- (ii) condizioni laterali alle due sezioni limite laterali (LBS, acronimo di *Lateral Border Section*, linee rosse in Figura 8-1a); condizioni terrestri alla sezione limite costiera (CBS, acronimo di *Coast Border Section*, linea bianca in Figura 8-1a).

Il campo di vento uniforme e variabile nel tempo calcolato da ERA5 è stato assegnato all'intero dominio, al fine di simulare l'effetto sulla superficie dell'acqua.

Sfruttando i dati così raccolti è stato quindi possibile riprodurre per la prima volta la tempesta verificatasi il 21 marzo 2018, che ha colpito tutta la costa tirrenica meridionale causando molteplici e devastanti allagamenti (vedi Figure 8-1a, e **Pasqua et al.**), caratterizzata da intensi venti sud-occidentali.

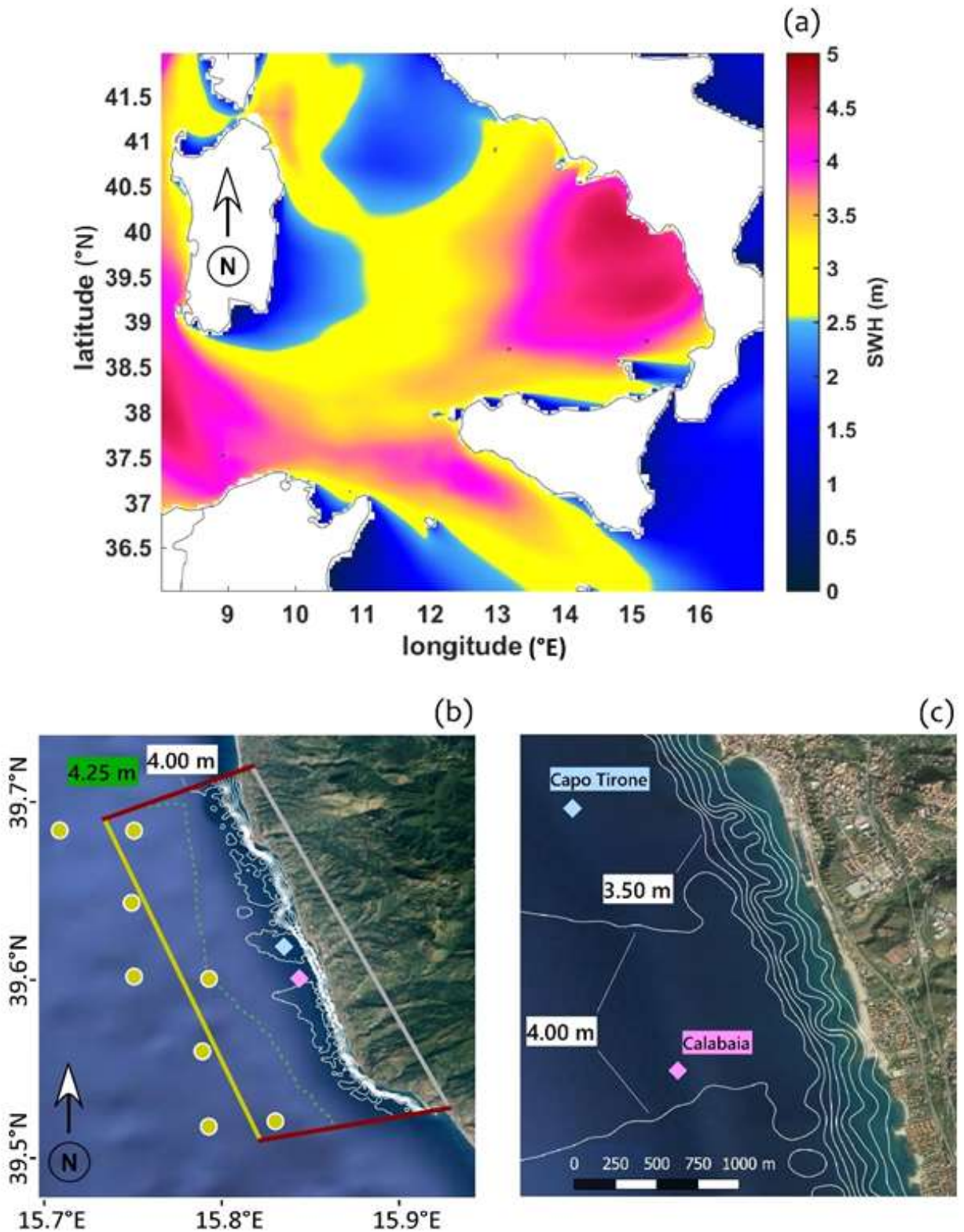


Figura 8-1. 21 marzo 2018, 09 UTC. (a) Distribuzione spaziale del dominio SWH e WAM. (b) e (c) mostrano il dominio MIKE e la batimetria dell'area. I pallini gialli indicano le sezioni di output in cui WAM calcola il clima ondoso; la linea solida gialla la sezione di confine verso il mare (SBS, cioè dove MIKE è forzato dall'SWH calcolato da WAM nelle sezioni di output); le linee rosse le due sezioni di confine laterali (LBS); la linea grigia la sezione di confine costiera (CBS). I rombi blu (Capo Tirone) e viola (Calabaia) illustrano i due siti ideali per il dispiegamento della boa. (Lo Feudo et al. 2020d)

La Figura 8-1a illustra l'SWH calcolato nel momento di massima potenza della tempesta (21 marzo, 9 UTC) nell'intero dominio del modello WAM (Figura 8-1a). I dati provenienti dal WAM sono stati utilizzati come forzante di vento e onde nel bordo off-shore del modello MIKE, per poter poi propagare la simulazione fin sotto-costa e vedere le altezze significative effettivamente giunte in prossimità della spiaggia (Figura 8-1c).

I risultati evidenziano un'ampia variabilità della SWH all'interno del Mar Tirreno meridionale, con onde più alte in prossimità della costa (Figura 8-2a).

Le simulazioni sotto-costa eseguite da MIKE mostrano un'ulteriore variabilità del clima ondoso all'interno dell'area di studio, influenzata dalla batimetria locale. In generale, gli SWH sono maggiori nelle acque più profonde e più esposte.

Inoltre, il promontorio di Diamante, situato a nord del MESCT, potrebbe causare regioni di riparo e minore energia d'onda rispetto all'area meridionale. Inoltre, i banchi di sabbia sub-tidali e le praterie di Posidonia oceanica causano regioni di rifrazione delle onde, particolarmente evidente in prossimità della linea di costa.



Figura 8-2. Danni prodotti dalla tempesta del 21 marzo 2018 ai beni del porto di Belvedere Marittimo. (Lo Feudo et al. 2020d)

A tal fine, per identificare la posizione ottimale per il dispiegamento di una boa di monitoraggio, è stato confrontato l'SWH calcolato in due sezioni idonee per il dispiegamento della boa con le condizioni limite dell'SWH offshore (cioè Calabaia e Capo Tirone, Figura 8-1c e Figura 8-3).

Per quanto riguarda l'evento del 21 marzo 2008 (Fig. 8-4a), Calabaia mostra un SWH leggermente meno influenzato dalla morfologia locale, a causa della minore elevazione del fondale.

Al fine di tracciare una tendenza generale, è stato calcolato sistematicamente lo smorzamento dell'SWH a partire dalla SBS (cioè SWH0 come forzante al modello) nelle stesse due sezioni e per direzioni d'onda che vanno da 180°N a 330°N e SWH0 costante che varia da 1 a 8 m (in Figura 8-3 le sei direzioni di provenienza delle onde, da notare come 330°N sia una direzione praticamente parallela alla costa).

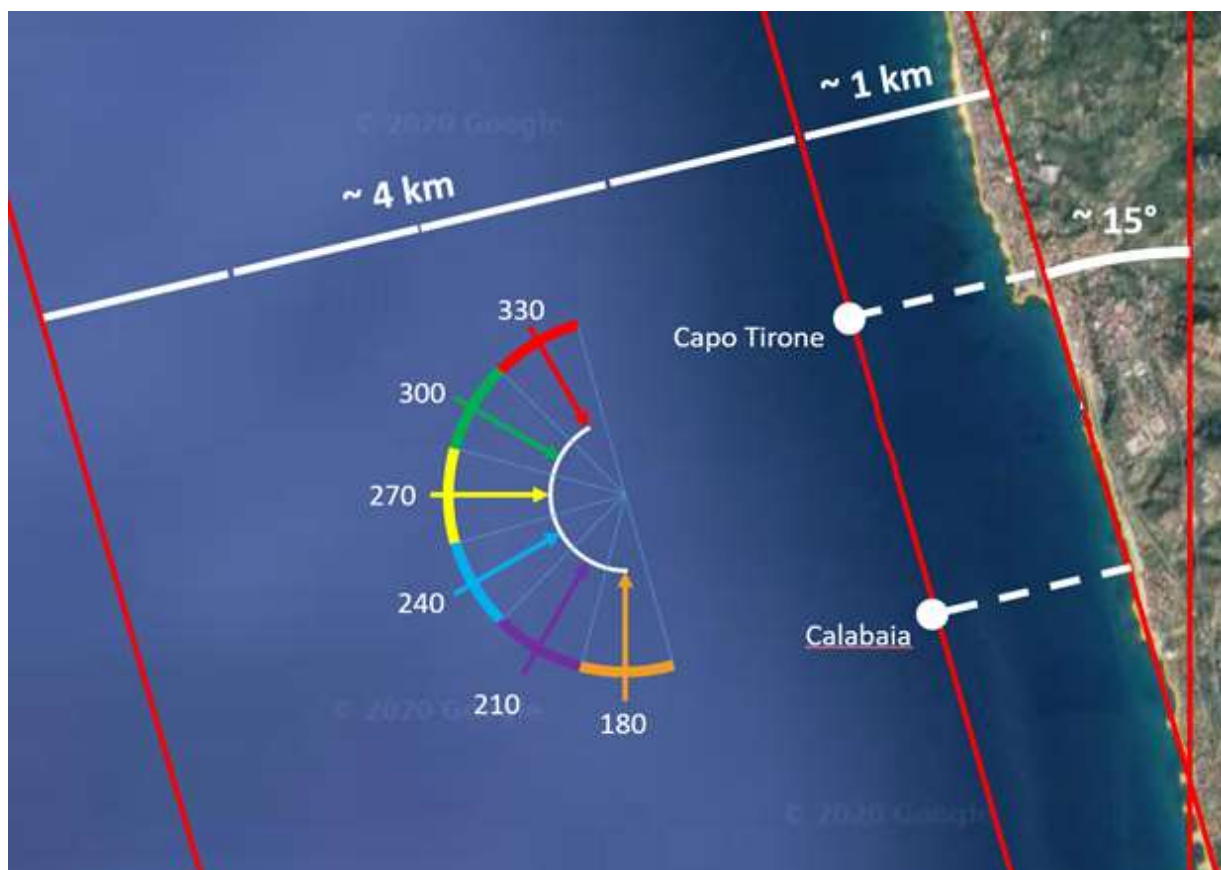


Figura 8-4. Direzioni di provenienza delle onde per le simulazioni relative al posizionamento di una boa ondometrica. Simulando le sei direzioni si riesce a comprendere quale dei due punti sia quello meno coperto dalle singolarità del paraggio, e quindi quello più idoneo al posizionamento della boa.

I risultati confermano che il valore di SWH più elevato giunge nella località Calabaia per tutte le tipologie di evento e direzioni (Figura 8-4b), nonché per l'evento estremo che ha distrutto parte del porto (Figura 8-4 a).

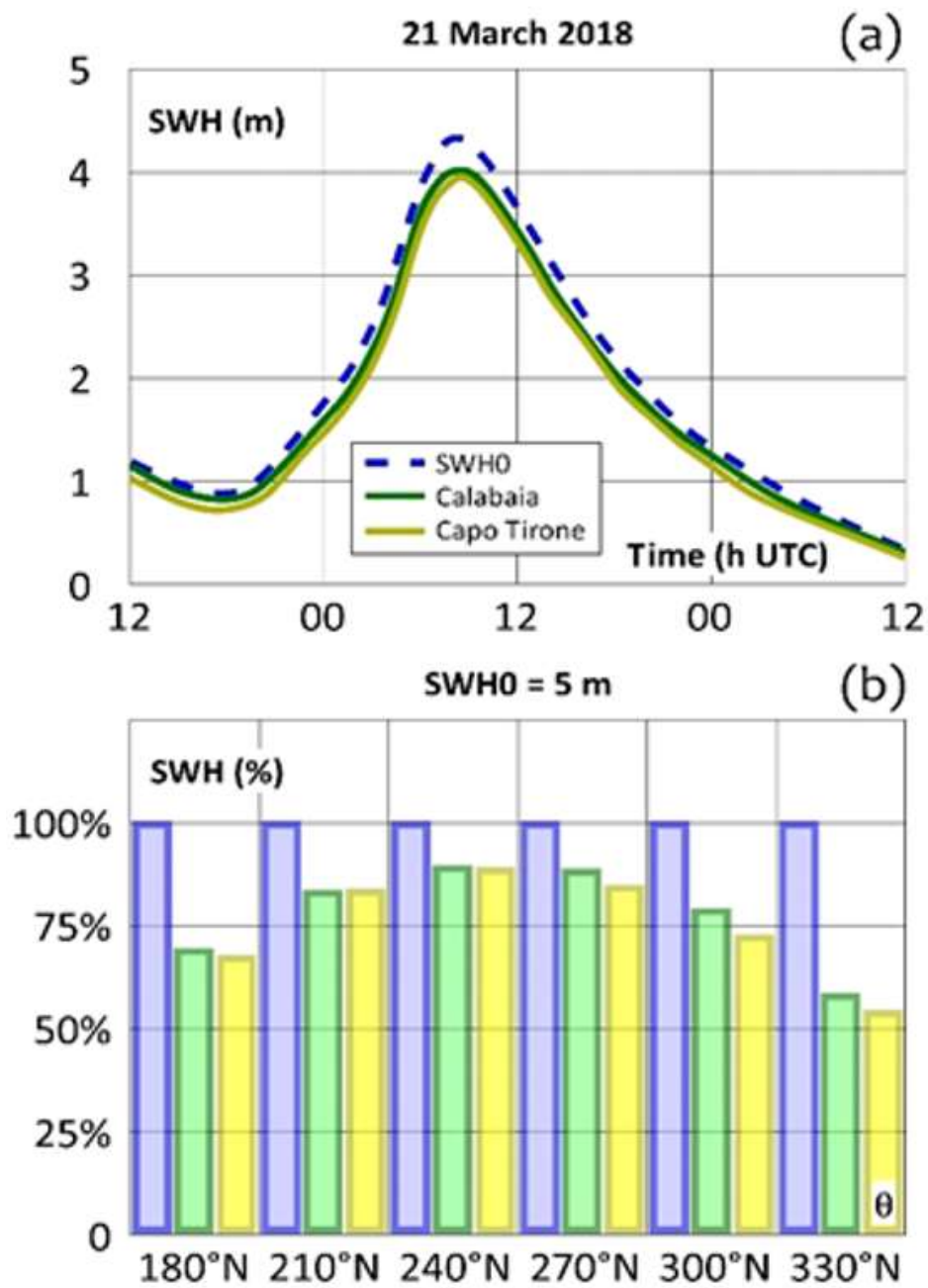


Figura 8-4. Confronto SWH tra la condizione limite verso il mare (SWH0, blu) e le due sezioni ammissibili per il dispiegamento della boa riportate in Fig. 6-10 (Calabaia, verde e Capo Tirone, giallo). (a) evento del 21 marzo 2018; (b) SWH0 = 5 m, θ da 180°N a 330°N. (Lo Feudo et al. 2020d)

E' necessario far notare che questa può essere considerata una valutazione preliminare, che dovrebbe essere seguita da uno studio approfondito (ad esempio, un'analisi ray-tracing) per confermare i risultati.

8.2 Simulazione del massimo evento di forzante registrato sulla costa, la tempesta del dicembre 1999

Sfruttando i dati provenienti da ERA5 e WAM (vedi capitolo 6) si è riusciti ad individuare la tempesta di maggior entità presente all'interno dei dati disponibili. In questo caso di modellare una tempesta relativamente recente che si è abbattuta sul Mar Mediterraneo e di lunga durata nel tempo (dal 25 al 29 dicembre 1999), facendo un confronto tra l'analisi del modello MIKE-21 con il modello SWAN-2DEF per avere un ulteriore riscontro numerico.

Come già detto, come input di forzante è stata scelta una mareggiata che si è abbattuta sul Tirreno nel dicembre 1999, ma la cui estensione ha coinvolto anche l'Atlantico settentrionale, l'Europa e il Mediterraneo, rendendola di fatto una tempesta nota in letteratura e ben documentata, ed anche in questo caso è stato possibile acquisire i dati attraverso l'utilizzo delle informazioni provenienti dall'ECMWF e processate poi col WAM al fine di avere un input utile ai modelli sottocosta come per il caso precedentemente descritto.

Complessivamente le aree interessate da questo evento sono state teatro di una serie di forti tempeste invernali (Anatol, Lothar e Martin), che hanno provocato più di 130 vittime e perdite economiche complessive per circa 13 miliardi di euro (**Ulbrich et al., 2001**). Le loro dimensioni e la capacità di viaggiare su lunghe distanze e sulla terraferma senza indebolirsi hanno prodotto perdite totali paragonabili a quelle degli uragani. Il 26 dicembre la tempesta Lothar ha colpito l'Europa centrale, seguita dalla tempesta Martin tra il 27 e il 28 dicembre, che ha causato ingenti danni dalla Francia nordoccidentale alla Germania meridionale, alla Svizzera, alla Spagna e all'Italia. Venti estremi (raffiche di oltre 40 m/s, che hanno battuto diversi record) hanno colpito questi Paesi, causando danni diffusi alla popolazione e ai beni, interruzioni multiple dell'elettricità e diverse conseguenze indirette, come l'interruzione delle reti informatiche, degli impianti di refrigerazione e la riduzione dei guadagni per molte aziende (**Bründl e Rickli, 2002**). Le tempeste sono state caratterizzate da una baroclinicità estremamente elevata in prossimità della traccia dei cicloni sull'Atlantico settentrionale orientale, estendendosi in parte all'Europa.

Lothar ha avuto origine da una forte area di divergenza sviluppatasi tra la Bretagna e la Cornovaglia, intensificandosi in modo quasi esplosivo in un ciclone extratropicale di 300 km di diametro e con gradienti di pressione interni paragonabili a quelli degli uragani di categoria 2. La depressione ha attraversato la costa della Normandia nelle prime ore del 26 dicembre, infuriando poi sulla Francia settentrionale, il Belgio, la Germania e indebolendosi definitivamente solo quando ha attraversato quasi a metà la Polonia. A metà pomeriggio del 27 dicembre, un secondo ciclone, denominato Martin, è atterrato a circa 200 km a sud dell'approdo di Lothar, mostrando genesi e caratteristiche simili. Martin ha attraversato rapidamente la

Francia centrale, la Svizzera e l'Italia settentrionale, per poi indebolirsi dopo essersi avvicinato ai Balcani.

Per quanto riguarda il Tirreno meridionale, la tempesta di vento prodotta dai cicloni Lothar e Martin è una delle più intense mai registrate alla boa di Cetraro. Il primo ciclone ha prodotto grandi venti sul bacino centrale del Mediterraneo durante il 27 dicembre, mentre la seconda tempesta è stata attiva il 28 e 29 dicembre. L'altezza massima delle onde ha superato i 10 m e sono stati segnalati ingenti danni lungo tutta la costa tirrenica meridionale (per maggiori dettagli sugli eventi si veda **Federico e Bellecci, 2004**).

La Figura 8-5 mostra il campo di pressione superficiale del livello del mare derivato dalla rianalisi CFS il 26-29 dicembre 1999, ore 12 UTC.

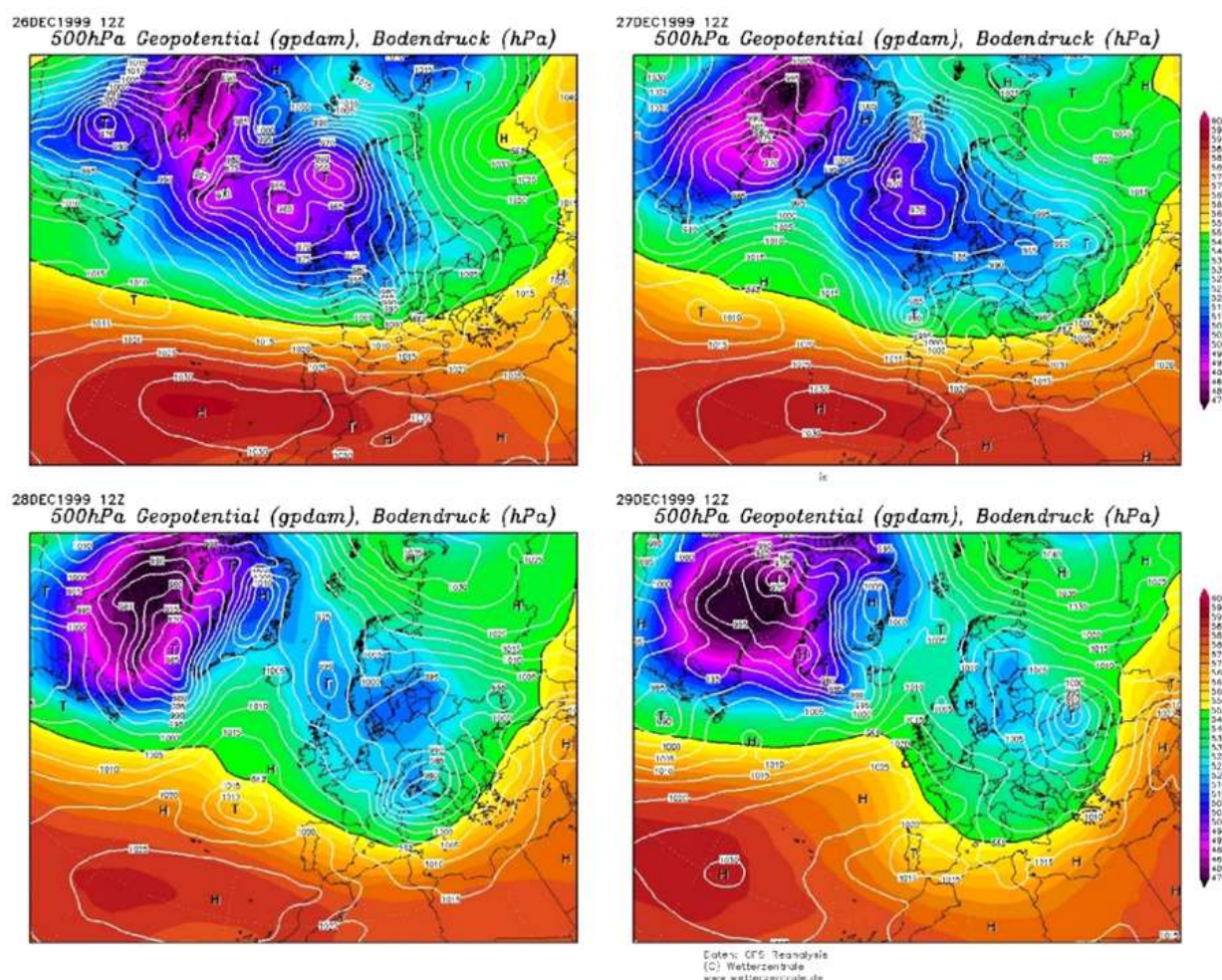


Figura 8-5. 26-29 dicembre 1999, ore 12 UTC. Rianalisi CFS di geopotenziale e pressione al suolo. Fonte www.wetterzentrale.de

La Figura 8-6 illustra l'altezza, la direzione e il periodo delle onde registrate dalla boa di Cetraro il 25-30 dicembre 1999.

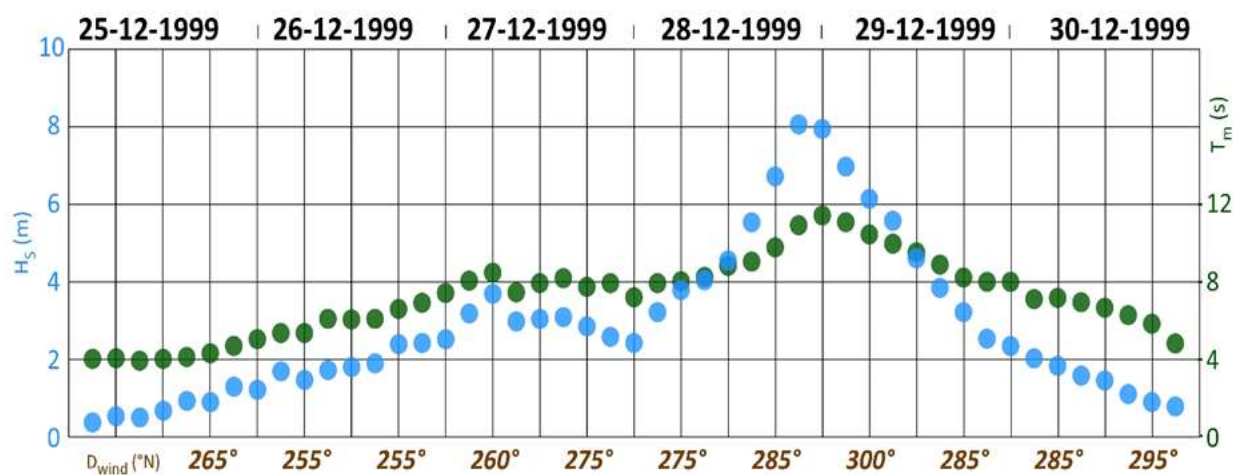


Figura 8-6. 25-30 dicembre 1999. Altezza d'onda significativa (pallini blu), periodo d'onda medio (pallini verdi) e direzione d'onda (etichette marroni) misurati alla boa di Cetraro. (Da Mel. et al. 2022)

8.2.1 Struttura delle simulazioni

Anche in questo caso la griglia del modello è chiusa 4 km a nord di Diamante, 3 km a sud di Capo Bonifati e 7 km verso il mare (Figura 8-7a).

La maglia di calcolo strutturata è costituita da circa 25.000 nodi e 50.000 elementi triangolari di dimensioni caratteristiche (lunghezza del lato) di quasi 500 m; elementi più piccoli (fino a 10 m) descrivono la zona costiera e l'insediamento urbano di Calabaia.

Avendo applicato in questo caso anche il modello SWAN-2DEF sono definite anche le caratteristiche della griglia SWAN. Questa griglia a maglie quadrate non è costante nella dimensione dei suoi elementi, ma per ricalcare quelle della griglia utilizzata per tutto il paraggio (vedi capitolo 5) è stata resa più densa nell'area in cui ricade Calabaia. Il lato più corto degli elementi rettangolari è rivolto verso l'area di studio, dove gli elementi sono quadrati con dimensioni caratteristiche di 6x6 metri mentre a largo sono pari a circa 200x200 metri (Fig. 8-7a).

Il modello è forzato imponendo (si veda sempre la Fig. 8-7a):

- (i) clima ondoso alla sezione di confine verso il mare (linea gialla tratteggiata) ogni 30 minuti;
- (ii) condizioni laterali alle due sezioni di "bordo laterale" vale a dire che ai bordi è assicurata la continuità numerica alle funzione di continuità dei flussi e di energi (linee grigie);
- (iii) condizioni di terra alla sezione di confine con la costa (linea nera);
- (iv) campo di vento uniforme ma variabile nel tempo su tutto il dominio.

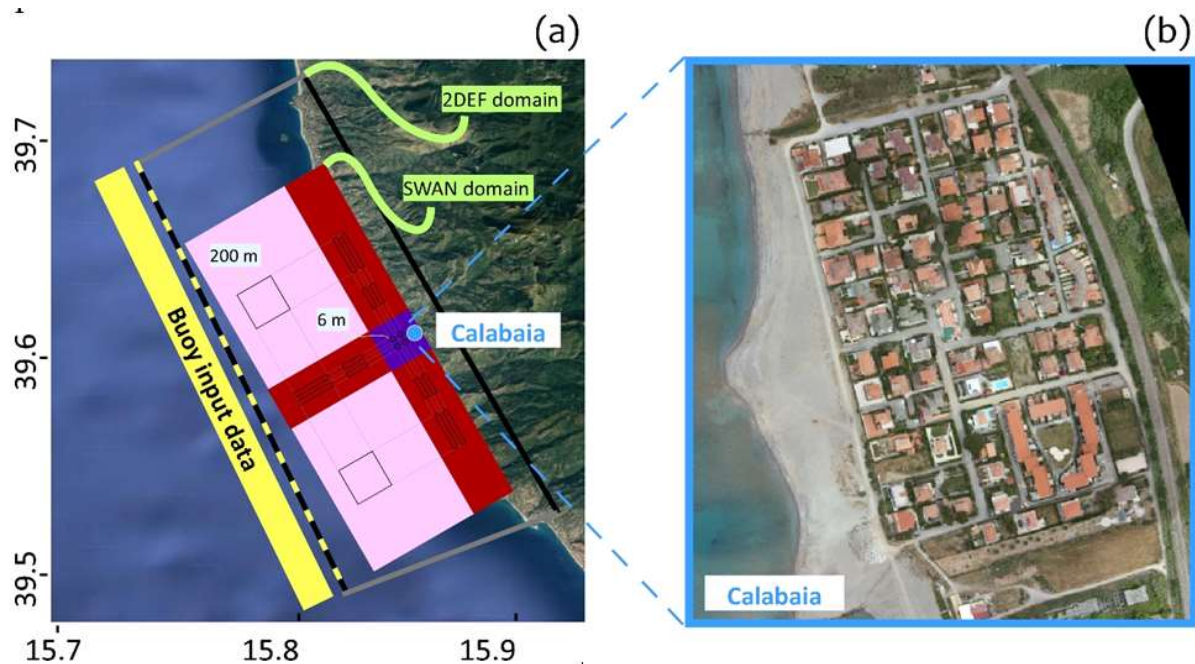


Figura 8-7. Dominio SWAN-2DEF: (a) la linea gialla tratteggiata indica la sezione di confine verso il mare dove il modello è forzato dal clima ondoso misurato dalla boa di Cetraro; le linee grigie le due sezioni di condizione limite laterale; la linea nera la sezione di confine della linea di costa. Il pallino blu si riferisce alla spiaggia di Calabaia. (b) ortofoto ad alta risoluzione della spiaggia di Calabaia, rilievo del 26th maggio 2021. (Da Mel. et al. 2022)

La griglia di calcolo così ottenuta è stata utilizzata sia per le simulazioni con MIKE sia per quelle con il modello SWAN-2DEF, e su di essa sono stati scelti 5 punti di monitoraggio, al fine di permettere un confronto fra gli output dei vari modelli (Figura 8-8).

I risultati sono stati quindi analizzati ogni ora (cioè utilizzando una media mobile sull'output prodotto ogni 15') nelle cinque sezioni perpendicolari alla linea di riva ed equidistanti (100 m, vedi Fig. 6-5). Inoltre, la portata è stata valutata tra le sezioni QA e QB (Fig 6-2 linea nera). Le quote del fondo (z) delle cinque sezioni sono: - 2,0 m (sezione 1); - 3,4 m (sezione 2); - 5,9 m (sezione 3); - 9,3 (sezione 4); - 10,9 (sezione 5). La sezione QA si trova in corrispondenza della barriera sommersa ($z = - 2,5$ m); la sezione QB nel terreno sopra il livello medio del mare ($z = + 3,0$ m).

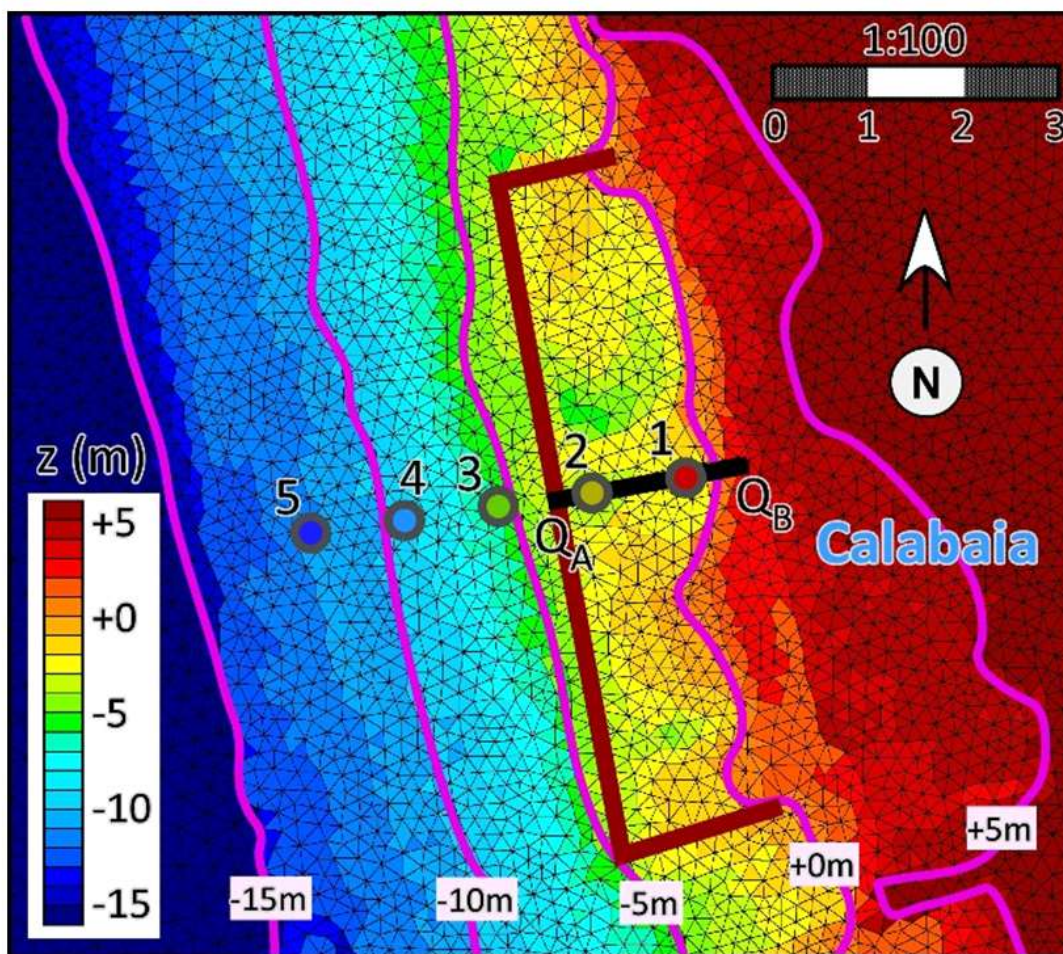


Figura 8-8. Griglia 2DEF e batimetria a Calabaia. La linea marrone rappresenta la barriera sommersa. I pallini rossi (sezione 1), gialli (sezione 2), verdi (sezione 3), azzurri (sezione 4), blu (sezione 5) rappresentano le cinque sezioni di uscita in cui sono state confrontate le caratteristiche delle onde e il livello del mare. La linea nera QA - QB identifica il transetto all'interno della barriera sommersa utilizzato per valutare la portata longitudinale. (Da Mel. et al. 2022)

8.2.2 Confronto dei risultati tra il modello accoppiato 2DEF + SWAN e MIKE-21

Il modello accoppiato 2DEF+SWAN è stato confrontato con MIKE durante l'evento estremo del 25-30 dicembre 1999. In particolare, al fine di evidenziare le differenze, sono state selezionate le due sezioni situate all'interno della barriera sommersa (cioè le sezioni 1 e 2, (vedi Figura 8-8). È stata confrontata l'altezza d'onda significativa, che è influenzata dalla morfologia locale, e il livello del mare, che è influenzato dal wind-wave setup (δ), dalle 00-CET del 26 dicembre alle 00-CET del 31 dicembre 1999 (Figura 8-9).

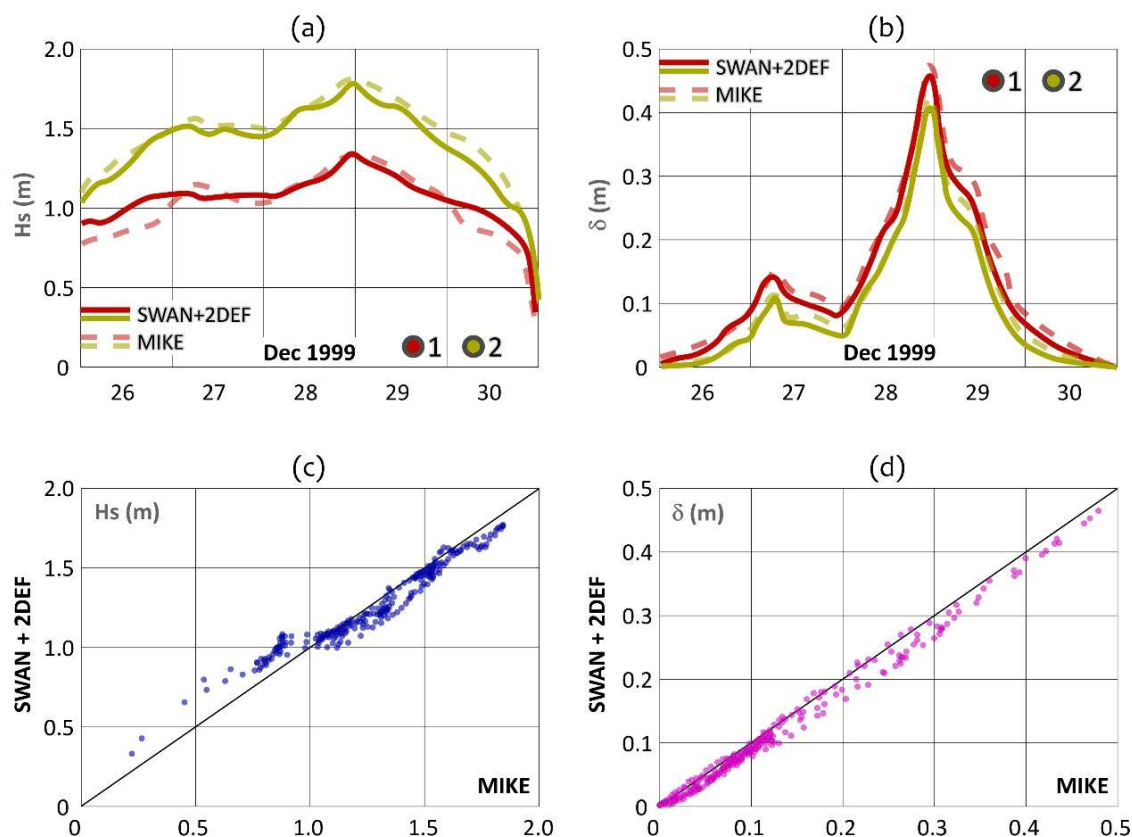


Figura 8-9. Evento del 25-30 dicembre 1999. Confronto tra l'altezza d'onda significativa SWAN+2DEF e MIKE ((a) e (c)) e l' wind-wave setup (δ) ((b) e (d)). (a) e (b) confrontano i due parametri sulla serie temporale 26 - 30 dicembre per la sezione 1 (in rosso) e la sezione 2 (in giallo, si veda la Fig. 8-8 per l'ubicazione delle sezioni); (c) e (d) mostrano gli scatter plot dei dati aggregati delle sezioni 1 e 2. (Da Mel. et al. 2022)

I risultati mostrano un'ottima concordanza tra i due sistemi di modellazione, con un coefficiente di regressione $R^2 > 0,99$ e una statistica di Fisher $F > 50.000$ sia per l'altezza d'onda significativa (H_s) che per il wind-wave setup (δ). L'errore standard è $< 0,1$ m per H_s e $< 0,01$ m per (δ).

In particolare, il costo computazionale del sistema accoppiato SWAN+2DEF è significativamente inferiore, in quanto richiede meno del 20% del tempo necessario per eseguire la stessa simulazione con MIKE. Ciò può essere attribuito fondamentalmente a due cause:

- il passo temporale di soluzione del clima d'onda da parte del modulo SWAN (mezz'ora), mentre MIKE risolve sia il clima d'onda che l'idrodinamica ogni passo temporale di calcolo (30 secondi);
- la seconda causa è direttamente imputabile al modello d'onda di MIKE, che risolvendo le equazioni sulla stessa griglia strutturata utilizzata dal modello idrodinamico, deve processare molti più elementi dello SWAN.

8.3 Sviluppo di proiezioni della pericolosità costiera dovute all'incremento del livello medio del mare

Il Sesto Rapporto di Valutazione sui Cambiamenti Climatici (AR6) dell'IPCC, pubblicato il 9 agosto 2021, ipotizza che gli scenari di incremento del livello del mare (SLR, acronimo inglese di *Sea Level Rise*) possano peggiorare la minaccia di inondazioni nelle aree costiere mondiali (Figura. 8-10). L'AR6 si basa sui più recenti dati dei modelli climatici e sulle tecniche analitiche per valutare gli impatti dei cambiamenti climatici. In particolare, la differenza più importante rispetto al precedente rapporto IPCC (AR5, **IPCC 2013**) è l'utilizzo di una nuova generazione di modelli climatici, che implementano le più recenti conoscenze scientifiche e tecnologiche per produrre proiezioni sul clima futuro.

Più di 30 istituzioni hanno contribuito a oltre 40 modelli. L'AR6 si basa su:

- (i) cinque percorsi socioeconomici condivisi (Shared Socioeconomic Pathways, SSP), ossia cinque scenari di proiezione dei cambiamenti socioeconomici globali fino al 2100 legati alle emissioni di gas serra nell'ambito di diverse politiche climatiche (**Armstrong et al., 2012; O'Neill et al., 2014; Dellink et al., 2015; Kc e Lutz, 2015; Riahi et al., 2017**),
- (ii) scenari Representative Concentration Pathway (RCP), relativi alla traiettoria della concentrazione di gas serra, ossia il possibile forcing radiativo nell'anno 2100, espresso in W/m^2 .

Gli scenari SSP sono denominati SSP1 Sostenibilità (strada verde), SSP2 Scenario di riferimento (strada intermedia), SSP3 Rivalità regionale (strada rocciosa), SSP4 Disuguaglianza (strada divisa), SSP5 Sviluppo a combustibili fossili (autostrada). In particolare, nello scenario SSP1, il mondo si sposterebbe gradualmente verso un percorso più sostenibile (ovvero, sviluppo sostenibile, riduzione delle disuguaglianze e minore utilizzo delle risorse del territorio). Lo scenario SSP2 ipotizza tendenze sociali, economiche e tecnologiche costanti, rispetto ai modelli storici. Nello scenario SSP3, un risorgente nazionalismo sposterebbe le politiche a diventare sempre più orientate alla sicurezza nazionale e regionale e alle questioni alimentari, con uno scarso interesse per le questioni ambientali. Nello scenario SSP4 si ipotizzano crescenti disuguaglianze e società poco istruite, con un degrado della coesione sociale e politiche ambientali che si concentrano solo su questioni locali. Nello scenario SSP5, si ipotizza che i mercati siano molto competitivi e integrati, con uno sfruttamento di enormi risorse di combustibili fossili e l'adozione di stili di vita ad alta intensità di risorse ed energia.

Gli scenari RCP vanno da $1,9 W/m^2$ (un percorso che raggiunge l'obiettivo al quale si aspirava durante dell'Accordo di Parigi) e $8,5 W/m^2$, ipotizzando un aumento delle emissioni di gas serra per tutto il secolo attuale (**IPCC, 2013**).

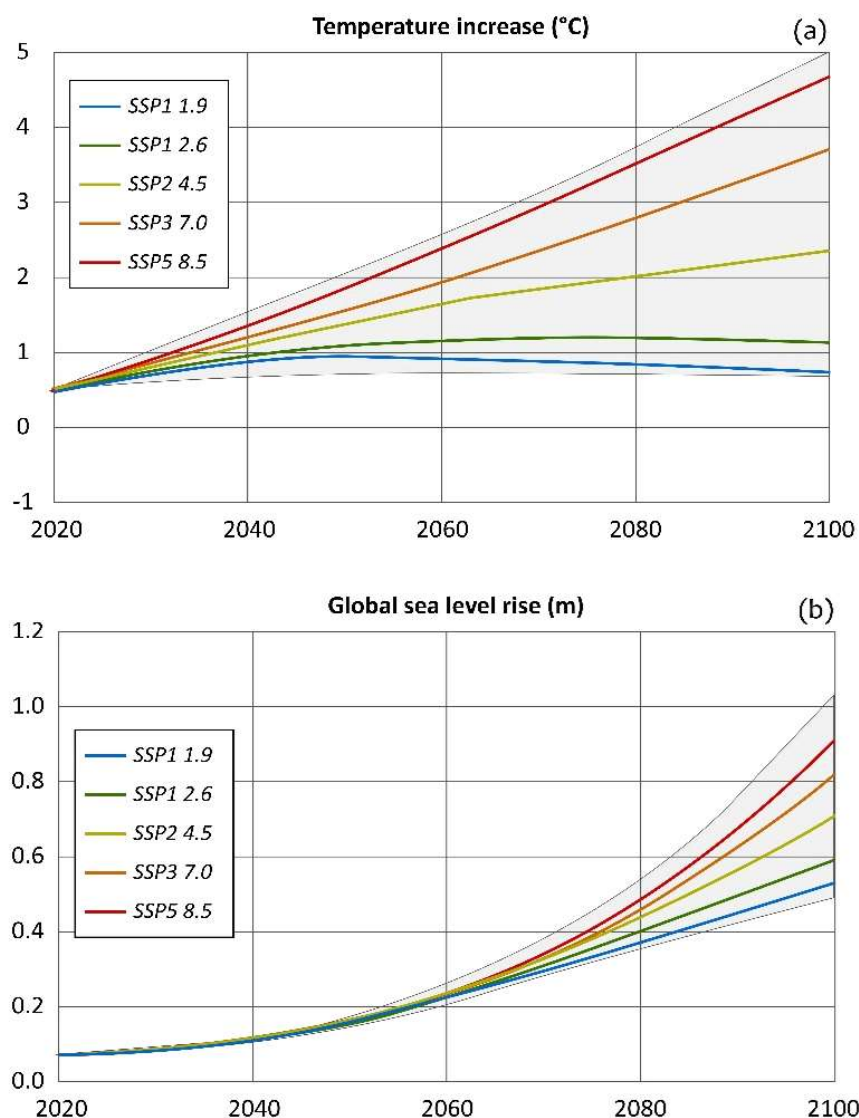


Figura 8-10. Proiezioni della temperatura (a) e del livello globale del mare (b) secondo i cinque scenari di probabilità previsti dal Sesto Rapporto IPCC. I valori si riferiscono al 1° gennaio di ogni decennio e sono calcolati rispetto al periodo 1986-2005; le aree grigie ombreggiate rappresentano l'intervallo di confidenza totale.

Le stime regionali della SLR sono ancora piuttosto incerte (**Rinaldo et al., 2008**), poiché per concretizzare le previsioni dell'IPCC è necessario che si verifichi un'accelerazione significativa nel secolo attuale (**Tomasicchio et al., 2018**). Frederikse et al., (2020) prevedono per il Mar Mediterraneo possibili discrepanze nella SLR relativa rispetto ai tre scenari RCPs, con particolare riferimento al periodo 2050-2100, a causa di una possibile riduzione del contributo dello scioglimento della calotta glaciale nel bacino subpolare del Nord Atlantico e in Groenlandia. Questa possibile deviazione è stata ampiamente affrontata attraverso modelli matematici che riproducono la circolazione nel Mar Mediterraneo. Adloff et al., 2018 e Slangen et al., 2017 stimano una SLR (locale) nel Mar Mediterraneo inferiore del 10% - 20% rispetto alle proiezioni di SLR globale.

La Figura 8-11 ripropone gli esiti della simulazione dell'evento del dicembre 1999, e illustra le mappe di allagamento della spiaggia di Calabaia simulate mediante il modello accoppiato SWAN-2DEF, con e senza l'intervento di difesa dal mare (SDI, acronimo di *Sea Defense Intervention*) realizzato nel 2006, e per tre diversi scenari di incremento del SLR (+ 0 m, + 1 m e + 2 m).



Figura 8-11. Evento del 28 dicembre 1999, 22 CET. Mappe di inondazione della spiaggia di Calabaia in diversi scenari di SLR (+ 0 m (a, d), +1 m (b, e) e + 2 m (c, f)). I pannelli (a) - (c) si riferiscono alla condizione attuale con l'intervento di difesa dal mare (WITH SDI), i pannelli (d) - (f) allo scenario morfologico precedente (cioè, pre-2006), senza alcun intervento (NO SDI). (Da Mel. et al. 2022)

I risultati mostrano l'efficacia dell'intervento nel proteggere l'insediamento di Calabaia se sottoposta alla tempesta tipo quella del 28 dicembre 1999, con particolare riferimento a uno scenario SLR di + 1 m (confronto tra i pannelli (b) ed (e)), dove le onde marine non si avvicinerebbero al villaggio in caso di presenza della difesa.

In particolare, una distanza ridotta tra la linea di riva e l'insediamento urbano può rappresentare una minaccia significativa per il villaggio, in quanto i fenomeni di RunUp e di scalzamento al piede delle fondazioni possono danneggiare gli edifici situati di fronte al mare.

Per la stessa tempesta, è stato analizzato l'effetto dello SLR sull'altezza dell'onda inshore (Figura. 8-12a) e sul set-up dell'onda (Fig. 8-12b) nelle due sezioni situate all'interno della barriera sommersa (cioè le sezioni 1 e 2, vedi Figura. 8-8).

Da questa analisi emerge che uno SLR di + 1 m comporterebbe un aumento dell'altezza dell'onda inshore di quasi un terzo in entrambe le sezioni, uno SLR di + 2 m di quasi due terzi (Figura. 8-12a). Al contrario, lo SLR ridurrebbe leggermente il set-up delle onde inshore (Figura. 8-12b).

In particolare, differenze simili nel set-up d'onda si notano anche se le sezioni 1 e 2 vengono spostate più vicino alla linea di costa, al fine di ottenere la stessa profondità di flusso nei tre scenari SLR.

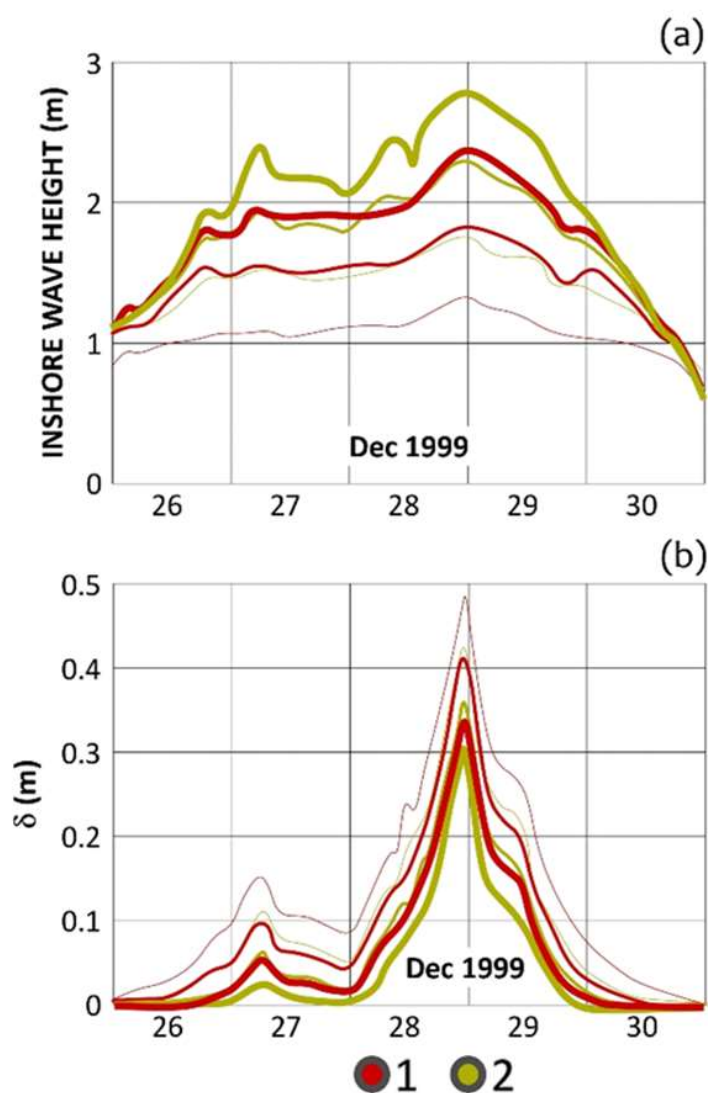


Figura 8-12 Evento del 25-30 dicembre 1999. Altezza d'onda significativa in mare aperto (a) e set-up d'onda (b) calcolati nelle sezioni 1 (rossa) e 2 gialla (Fig. 7-4) per scenari SLR di + 0 m (linee più sottili), + 1 m (linee intermedie) e + 2 m (linee più spesse). (Da Mel. et al. 2022)

8.3.1 Incremento di SLR ed effetti al fondo

L'effetto dello SDI sull'idrodinamica costiera è significativo, in quanto influisce sulla corrente longshore e riduce la corrente sottocosta longitudinale vicino alla spiaggia.

La Figura 8-13 confronta il campo di velocità inshore per un'onda offshore costante di 4 m da 195 °N. Sono stati analizzati scenari SLR di + 0 m e + 1 m, confrontando la condizione con interventi di difesa del mare (SDI), con il solo ripascimento e nessuna barriera sommersa (NB) e con nessun intervento (NO). I risultati evidenziano l'impatto della barriera sommersa e del ripascimento nel ridurre la corrente longshore.

Questo effetto è fondamentale per prevenire ulteriori processi di erosione della linea di costa, che possono rappresentare un'ulteriore minaccia per l'insediamento di Calab

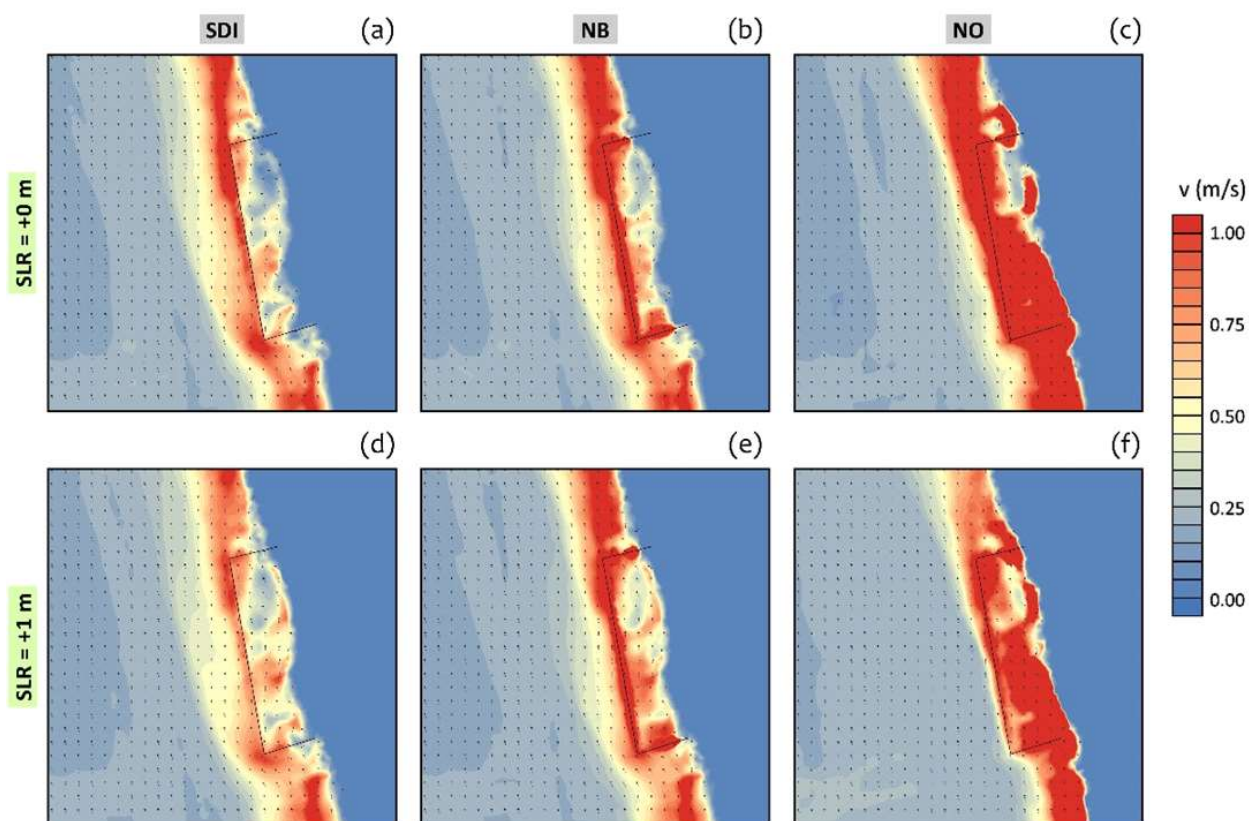


Figura 8-13. Altezza d'onda significativa offshore di 4 m, direzione di arrivo 195 °N. I pannelli confrontano il campo di velocità bidimensionale tra la condizione di barriera sommersa più ripascimento (pannelli (a) e (d)); solo ripascimento (pannelli (b) e (e)); nessun intervento (pannelli (c) e (f)). (a) - (c) scenario SLR di + 0 m; (d) - (f) scenario SLR di + 1 m. **(Da Mel. et al. 2022)**

Gli effetti dello SDI sull'idrodinamica costiera sono stati analizzati in termini di alterazione delle portate attraverso il transetto QA - QB (Figura 8-8).

Sono state considerate tre altezze d'onda offshore (H_s0 , cioè 4 m, 6 m e 8 m), sette direzioni d'onda (cioè 165 °N, 195 °N, 225 °N, 255 °N, 285 °N, 315 °N e 345 °N) e due scenari SLR (+ 0 m e + 1 m).

I pannelli in figura 8-14 (a) e (b) confrontano rispettivamente i flussi effettivi (Q_{SDI} , cioè il flusso in termini di portata con l'SDI) con le condizioni senza barriera (Q_{NB}) e senza alcun intervento (Q_{NO}).

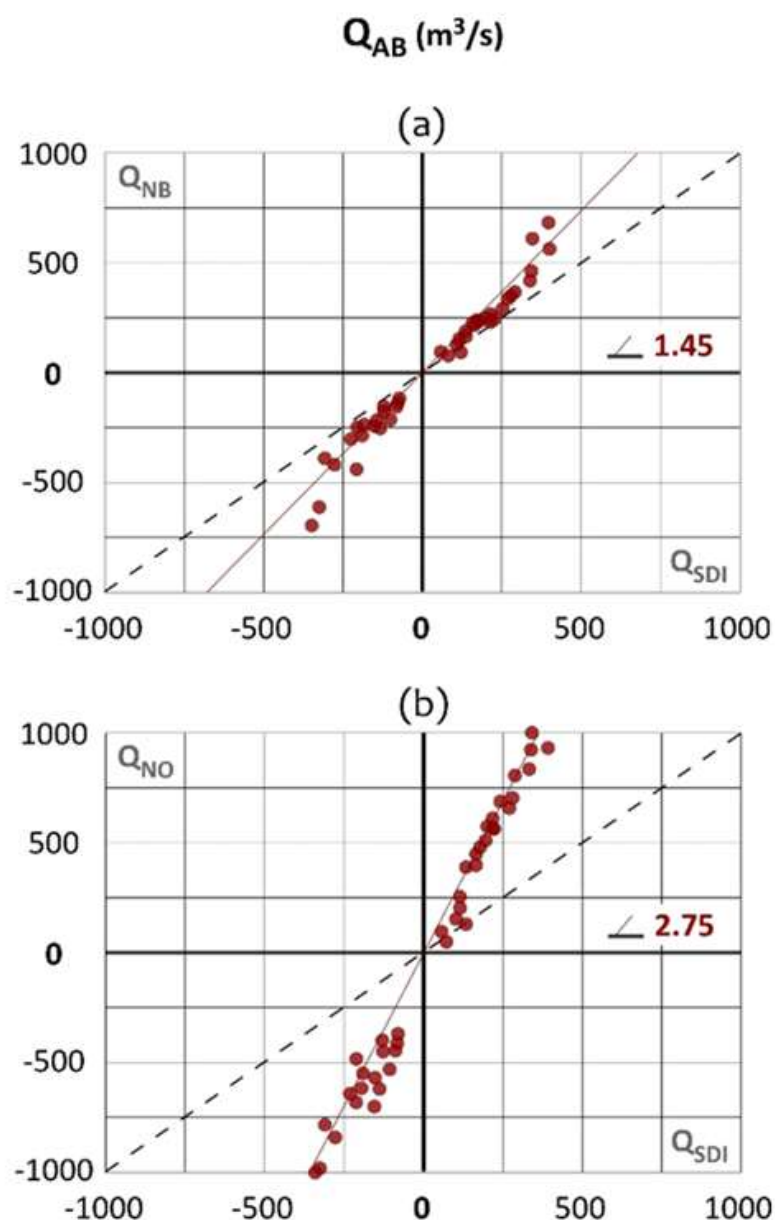
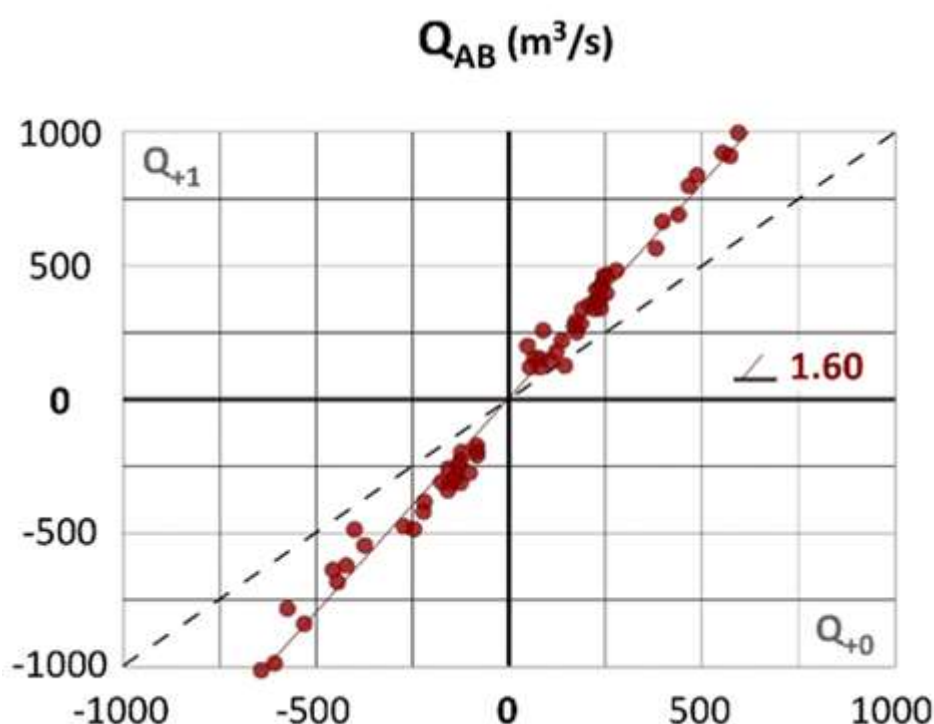


Figura 8-14. Confronto della portata attraverso il transetto QA - QB (Fig. 8-8). Il dataset include tutte le altezze e le direzioni delle onde che sono state simulate in condizioni stazionarie e nei due scenari SLR di + 0 m e + 1 m. (a) condizione con intervento di difesa del mare vs. solo ripascimento; (b) condizione con intervento di difesa del mare vs. nessun intervento; (c) innalzamento del livello del mare di + 0 m vs. + 1 m; (d) altezza significativa delle onde offshore di 4 m vs. 6 m (rosso) e 8 m (giallo). (Da Mel. et al. 2022)

Il confronto dimostra che lo SDI riduce la portata longshore attraverso il transetto QA - QB per tutte le caratteristiche dell'onda offshore e per entrambi gli scenari SLR.

La relazione è lineare, con pendenze di regressione di 1,45 (effetto della barriera sommersa, pannello (a)) e 2,75 (effetto dell'intero SDI, pannello (b)). Questa differenza più ampia è dovuta alla significativa variazione dell'elevazione del fondale marino avvenuta dopo il ripascimento.

La Figura 8-15 infine confronta tutti i risultati tra i due scenari SLR analizzati rispetto a tutte le direzioni, a tutte le forzanti d'onda prese in considerazione e della presenza o meno delle difese (SDI, NB e NO). I risultati mostrano un incremento di portata di circa il 60% per lo scenario + 1 m, indipendentemente dalla forzante d'onda e dal tipo di intervento di difesa del mare.



In particolare, tutte le relazioni sono lineari, con un coefficiente di correlazione R^2 maggiore di 0,95.

Figura 8-15. Confronto della portata attraverso il transetto QA - QB (Fig. 8-8). Il dataset include tutte le altezze e le direzioni delle onde che sono state simulate in condizioni stazionarie e nei due scenari SLR di + 0 m e + 1 m. e con tutte le tipologie di intervento ed opera analizzate (Da Mel. et al. 2022)

9. Conclusioni

L'obiettivo del progetto dottorale e di questo elaborato è stato quello di individuare una metodologia speditiva per supportare una visione programmatica nell'ambito della gestione dei rischi costieri, esemplificando un sistema di supporto alle decisioni (DDS).

In letteratura sono reperibili DSS nella casistica caratterizzata per la programmazione e la gestione degli interventi in area costiera, ma la reale applicazione risulta essere non immediata a causa della difficoltà di reperimento di dati validati, di particolarità locali o di sovrapposizione di problemi di diversa natura.

Lo sviluppo del presente lavoro ha consentito di delimitare una metodologia generale per la gestione dell'erosione e degli allagamenti costieri, che sono i problemi più impattanti tra i rischi per i litorali.

È stata valutata la difficoltà di comprendere tutte le possibili problematiche impattanti in un ambiente costiero e, quindi, si è individuata e analizzata una tipologia di difesa che fosse più semplice da integrare all'interno del sistema spiaggia, e che permettesse contemporaneamente di ridurre il più possibile l'impatto sia paesaggistico che ambientale, fornendo al contempo una adeguata difesa dall'erosione e dagli allagamenti da onde da mare.

Ai fini applicativi si è fatto riferimento a un esempio concreto di buona pratica individuando la sede e analizzando la tipologia di problemi che si mostravano nella tipologia di interventi individuati nel caso di studio.

Si è scelto di identificare l'area in funzione delle informazioni più facilmente reperibili rispetto alle problematiche costiere della Calabria.

Nell'ambito del territorio costiero calabrese l'area della costa tirrenica Cosentina è sicuramente quella sulla quale sono disponibili le maggiori informazioni a causa del grande impatto che ha avuto l'erosione costiera su questo territorio. Infatti, è stato possibile recuperare una grande quantità di dati, provenienti da studi e pubblicazioni datate anche da più di 50 anni, rendendo la ricerca bibliografica di partenza una importante risorsa per la caratterizzazione generale dell'area di studio. Da questa fase di raccolta dati è immediatamente risultato evidente come la costa tirrenica cosentina sia da quasi 100 anni oggetto di studio da parte della comunità scientifica proprio a causa dei problemi legati fondamentalmente agli allagamenti da mare e all'erosione costiera sempre più evidente.

Gli studi scientifici sono stati negli anni accompagnati da varie pratiche di intervento da parte dell'amministrazione locale con lo scopo

di tentare di arginare il fenomeno erosivo e la perdita dei sedimenti, e contemporaneamente con al fine di mantenere una distanza tra la linea di costa e i centri abitati.

La necessità di realizzare interventi in emergenza ha però comportato il dover scegliere tipologie di opere che hanno arrestato il problema, ma che contemporaneamente sono risultate essere poco adatte alla protezione dell'aspetto naturalistico e paesaggistico delle aree costiere, recando ulteriore danno all'ecosistema locale e impattando sulla fruibilità balneare delle aree. Osservando questa area risulta visivamente dominante la presenza di barriere radenti e muri a mare per tutta la lunghezza del tratto di costa che va da Diamante fino al litorale di Falerna che, anche con lo scopo di proteggere dall'erosione il tratto ferroviario che corre lungo tutta la costa tirrenica, ha determinato una forma di antropizzazione particolarmente invasiva.

Queste tipologie di opere sono effettivamente risultate efficaci nell'arrestare l'erosione dei sedimenti di spiaggia, ma contemporaneamente è risultata un elemento di degrado rispetto agli aspetti naturalistici e paesaggistici, lasciando pertanto un ambiente dalla scarsa fruibilità turistica e ricreativa.

La ricerca bibliografica condotta ha però evidenziato come negli anni sia nata la volontà di individuare delle strategie di difesa alternative e più integrate nell'ambiente, e addirittura in grado di essere utili ai fini della ricostruzione e rinaturalizzazione di una spiaggia per come presente prima del verificarsi dei fenomeni erosivi e delle conseguenti opere realizzate nell'emergenza.

In particolare, si è analizzato il caso di studio del Litorale di Belvedere Marittimo sul quale nel corso degli ultimi 50 anni, nel tentativo di proteggere gli edifici ormai raggiunti dalla linea di spiaggia, vennero realizzate diverse barriere composte da massi gettati alla rinfusa sia radenti agli edifici che distaccate dalla linea di costa.

Sullo stesso litorale, però, agli inizi degli anni 2000 è stato realizzato un intervento di ricostruzione della spiaggia nella località di Calabaia, composto da un ripascimento protetto da una barriera sommersa. L'intervento venne accompagnato da diversi studi di monitoraggio dell'opera e di studio in laboratorio al fine di comprenderne gli effetti e l'efficacia.

Questa spiaggia protetta dalla barriera sommersa è stata quindi scelta come caso studio e come esempio di buona pratica di gestione del problema, e si è deciso quindi di indirizzare la successiva parte della ricerca specificatamente sulla metodologia e sulla tecnica di realizzazione, andando a individuare tutta la documentazione disponibile, incluse le fasi di monitoraggio degli anni successivi che verificavano le variazioni del profilo di spiaggia, al fine di analizzare

l'efficacia dell'opera e ipotizzare quindi la possibilità di ricostruire un litorale attraverso questo tipo di interventi, definendone una metodologia di validità più generale. Avendo quindi riscontrato che sia la documentazione dei monitoraggi che il confronto delle foto satellitari davano prova della durabilità dell'intervento in esame, si è deciso di indagare il ripascimento protetto sotto diversi aspetti per ricavarne informazioni utili e generalizzabili.

Volendo avere un riscontro circa l'efficacia generale di queste opere si è cercato un ambiente di simulazione all'interno del quale poter modellare una casistica variabile.

La soluzione individuata è stata quella di modellare in ambiente numerico l'opera al fine di verificarne il campo di applicabilità e l'effettiva utilità.

Si è scelto dunque di simulare l'opera all'interno dell'ambiente di calcolo bidimensionale MIKE-21FM, utilizzando un modello idrodinamico (Shallow Water) accoppiato ad un modello d'onda (Wave Action Equation). In questo ambiente è stata riprodotta una spiaggia protetta al piede da una barriera sommersa, sulla quale è stata simulata la propagazione dell'effetto di una forzante d'onda proveniente da largo ad altezza significativa costante e monodirezionali. Al fine di generalizzare lo studio le simulazioni sono state effettuate, rispetto a differenti profondità della cresta della barriera e differenti forzanti in ingresso, coprendo il campo di applicabilità dell'opera a tutte le casistiche possibili, individuando dipendenze parametriche generalizzabili. I dati così ottenuti inseriti all'interno di un grafico hanno permesso di estrapolare un abaco che è stato successivamente riassunto all'interno di una formulazione, la quale permette in maniera speditiva di quantificare l'efficacia della barriera rispetto alla profondità della sua cresta ed alla forzante in ingresso. Si è riscontrato che è il massimo dell'efficacia di abbattimento della forzante d'onda è attestabile in poco meno del 40% dell'energia in ingresso, e che contestualmente la barriera sommersa non è in grado di interferire con le onde di piccole dimensioni, risultando questo ultimo aspetto favorevole in una circolazione libera delle correnti all'interno del bacino di ripascimento, rendendolo quindi raggiungibile dalle specie biologiche locali, ed evitando la stagnazione di acqua.

Il problema riscontrato in questa tipologia di analisi è stato quello di essere necessitati a ricorrere a simulazioni sintetiche, con modesto riscontro con la realtà dei fenomeni meteorologici locali. Avendo però individuato nei modelli accoppiati uno strumento utile per le indagini degli impatti delle mareggiate si è deciso di proseguire la ricerca cercando di individuare le possibili applicazioni di questa tipologia di simulazioni.

Il principale problema riscontrato però è stato quello della mancanza di dati meteo climatici relativi al territorio di Belvedere Marittimo. L'unico strumento presente sul territorio che ha rilevato dati e stata la boa di Cetraro presente dal 1999 e dotata di un ondometro, ma dismessa nel 2008. I dati a disposizione erano quindi insufficienti al fine di produrre delle analisi significative. Per questo motivo si decise di proseguire le indagini attraverso l'utilizzo del database ERA5 dell'ECMWF, che copre 70 anni di dati meteo climatici a scala di Mediterraneo, e di confrontarlo con le simulazioni hindcast del modello WAM. Seguendo tale metodologia è stato possibile individuare un set di dati sul quale realizzare delle analisi statistiche, in base alle quali poter realizzare il confronto fra i diversi dataset disponibili su scala globale e, quindi suscettibile di essere generalizzato e replicato in ambiti diversi dal caso di studio.

Con i dati provenienti dal modello WAM è stato altresì possibile realizzare la simulazione di un evento reale, in particolare è stato scelto di affrontare l'intensa mareggiata che si è abbattuta sul litorale di Belvedere Marittimo nel mese di marzo del 1999, causa della parziale distruzione del porto turistico locale.

La maggiore validità di queste nuove simulazioni è stata data anche dal condizione che i dati WAM hanno permesso di introdurre come forzante nel modello MIKE non soltanto i valori di altezza significativa ma anche i dati relativi al vento, permettendo di simulare gli effetti di mare vivo e di mare morto, aumentando la precisione di quanto modellato.

Un ulteriore elemento limitante nella simulazione specifica del caso di studio, ma caratterizzante in generale tali problematiche, sicuramente da superare è quello legato alla bassa qualità dei dati planobatimetrici, dovuti al fatto che i rilievi a disposizione risultavano essere particolarmente datati.

In generale la qualità delle rilevazioni a supporto di analisi idrodinamiche costiere sono caratterizzate o da rilievi satellitari con le specifiche limitazioni nella precisioni o da rilievi topografici tradizionali con le specifiche casistiche di errori. È stato, quindi, deciso di effettuare delle campagne di rilievo territoriale con strumentazione innovative e speditive, in maniera tale dopo poter disporre di informazioni aggiornate e di migliore qualità.

Conseguentemente si è scelto di condurre un rilievo della parte emersa dalla costa attraverso l'uso di un drone aereo che ho scattato una serie di fotografie dalle quali è stato ricostruito prima un rilievo aerofotogrammetrico dal quale è stato successivamente derivato un modello digitale del terreno. La parte sommersa invece è stata rilevata attraverso l'utilizzo di un ecoscandaglio dotato di GPS, i cui dati sono

stati poi elaborati attraverso un apposito software che ha permesso di tracciare l'andamento batimetrico del fondo. I dati provenienti dai due rilievi sono stati poi riportati in ambiente GIS e unificati in un unico modello piano batimetrico del territorio particolarmente accurato.

Avendo quindi a disposizione informazioni meteo climatiche e piano batimetriche affidabili il problema residuale è risultato essere l'impossibilità di effettuare una taratura reale dei parametri del modello accoppiato MIKE rispetto ad un dispositivo di misura reale.

Questa mancanza è dovuta all'assenza di una boa ondometrica su questo tratto di costa, e pertanto l'unica soluzione percorribile è stata quella di affiancare un secondo modello accoppiato, composto dal modello idrodinamico 2DEF e dal modello d'onda SWAN, al fine di avere un secondo riscontro rispetto alle simulazioni effettuate col primo modello.

Il confronto è stato effettuato su diversi punti di controllo che hanno dato un'ottima corrispondenza, fornendo la possibilità di considerare affidabili i risultati ottenuti. Per questo motivo si è scelto di simulare un ulteriore evento reale, facendo riferimento alla mareggiata del dicembre 1999, che è stato uno degli eventi più gravosi fra quelli che si sono abbattuti sul Mediterraneo.

La corrispondenza fra gli esiti del modello MIKE e 2DEF-SWAN è stata anche in questo caso elevata, e si è pertanto deciso di percorrere un ulteriore avanzamento nelle simulazioni.

Facendo riferimento agli scenari di innalzamento del livello del medio mare proposti dall'ultimo report IPCC si è deciso di simulare incrementi di 1 m e 2 m rispetto alle stesse forzanti d'onda relative alla mareggiata del 1999.

Queste simulazioni sono state poi effettuate rimuovendo la presenza della barriera sommersa e del ripascimento, per verificare gli effetti della spiaggia protetta nei possibili scenari futuri. Con questa impostazione è stato possibile verificare che la presenza della spiaggia e della barriera proteggono il centro abitato anche nel caso di innalzamento del livello del medio mare, e dai grafici dei flussi risulta evidente come le velocità sottocosto in presenza di barriera e di spiaggia siano molto inferiori, riducendo la possibilità di erosione durante gli eventi estremi.

Il risultato conseguito dalla ricerca è stato quello di aver individuato una metodologia utilizzabile anche in presenza di limitazione di dati e di aver esplicitato l'efficacia e la metodologia di analisi per quantificarla che ha caratteri generalizzabili.

Lo sviluppo di questo elaborato, pur non potendo conseguire la definizione di un completo DDS, offre tutti gli elementi per supportare le scelte tecniche e gestionali per realizzare opere morbide

caratterizzate da ripascimenti protetti da barriere sommerse, che rappresentano una tipologia di intervento di ampia possibilità di diffusione in paraggi sottoposti a erosione e caratterizzati da fenomeni di campo vicino in acque basse.

La metodologia delimitata nel corso dello studio, in conclusione, può essere definita in termini generalizzabili facendo riferimento a una sequenza definita dalle seguenti 5 fasi di seguito illustrate (Figura 8-1).

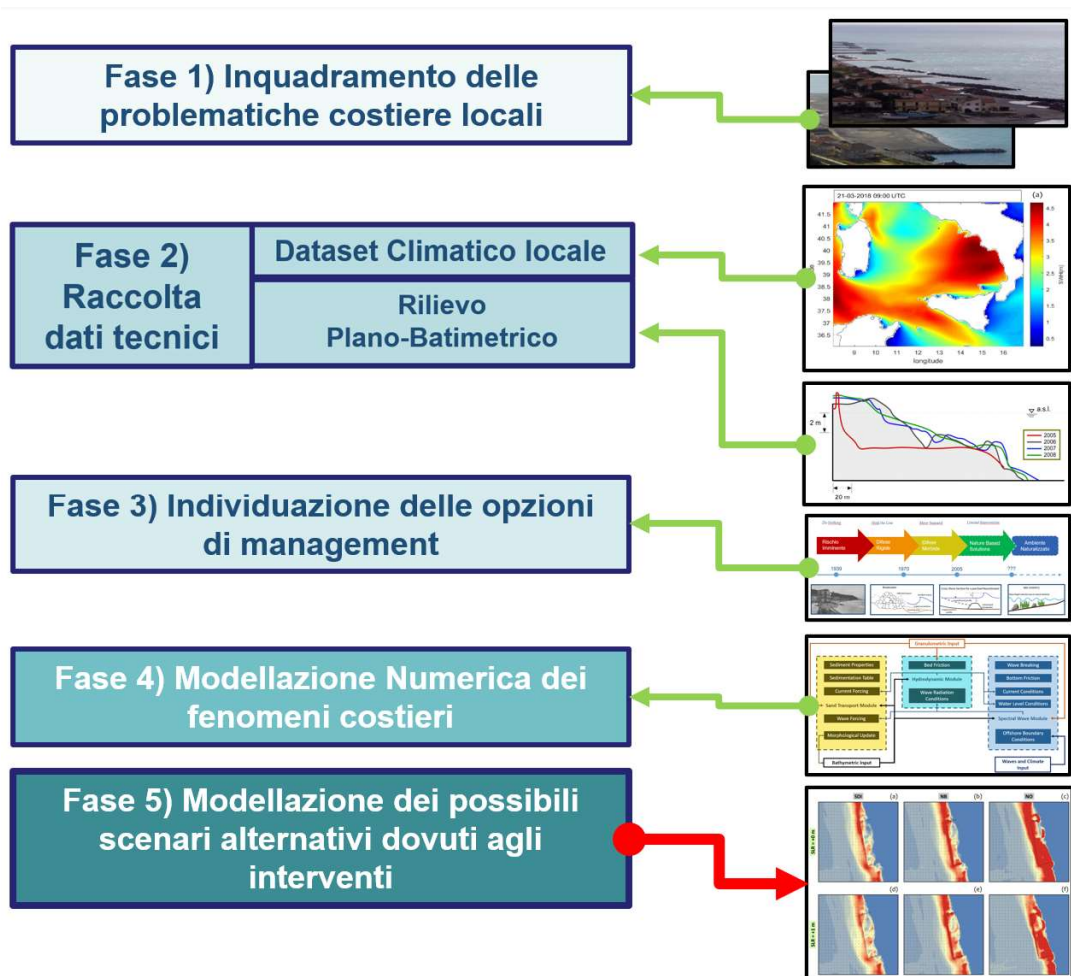


Figura 8-1 rappresentazione delle fasi dell'approccio metodologico individuato per la gestione del rischio costiero

- Fase 1) – In questa prima parte bisogna studiare il territorio e le sue problematiche, avendo però cura nell'evidenziare quali siano tutte le possibili cause che contribuiscono a generarle;
- Fase 2) – Nella seconda fase è necessario colmare tutti i gap cognitivi che possono servire alle successive analisi tecniche per le possibili soluzioni, raccogliendo informazioni legate alla batimetria, al clima, alla presenza di strumenti di misura, e studi precedentemente condotti;

- Fase 3) – Successivamente è necessario effettuare una analisi della letteratura scientifica e tecnica che permetta di individuare quali sono le migliori opzioni di management per quella tipologia di problema, le novità proposte dal progresso tecnologico e conoscitivo, ed anche analizzare le procedure necessarie alla realizzazione dell'opera;
- Fase 4) – In questo momento è possibile procedere ad una analisi numerica di quella che è la situazione attuale, ed effettuare una taratura locale dei sistemi di modellazione rispetto ai dati riscontrabili in situ, verificando quindi l'affidabilità del sistema;
- Fase 5) – Nell'ultima fase è possibile effettuare, quindi, una modellazione delle alternative di intervento disponibili, facendo riferimento anche alla possibilità di verificare scenari previsionali futuri che meglio facciano comprendere le ripercussioni in situazioni per le quali l'opera non è stata direttamente pensata e verificata, aumentando la percezione dell'utilità ma anche della durabilità dell'intervento.

Effettuando questa procedura di analisi, modellazione e previsione degli scenari, per come esemplificato nel caso di studio della ricerca, il decisore acquisisce la possibilità di individuare una strategia di intervento per la mitigazione del rischio di erosione costiera che possa soddisfare diversi criteri di efficacia e che risulta quale attività preliminare e sostanziale per la definizione di un DDS esaustivo.

Appendice

La tabella riporta gli acronimi utilizzati nell'elaborato

Elenco degli acronimi utilizzati in questo lavoro (ordine alfabetico).

<i>CBS</i>	<i>Sezione di confine costiero</i>
<i>DJF</i>	<i>Inverno (dicembre - febbraio)</i>
<i>ERA5</i>	<i>Rianalisi ECMWF v5</i>
<i>ECMWF</i>	<i>Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio raggio</i>
<i>HMAX</i>	<i>Altezza massima dell'onda</i>
<i>IFS41r2</i>	<i>Modello ECMWF Integrated Forecast System</i>
<i>ITA</i>	<i>Analisi delle tendenze innovative</i>
<i>JJA</i>	<i>Estate (giugno - agosto)</i>
<i>LBS</i>	<i>Sezione di confine laterale</i>
<i>MAE</i>	<i>Errore assoluto medio</i>
<i>MAM</i>	<i>Primavera (marzo - maggio)</i>
<i>MESCT</i>	<i>Stazione Sperimentale Marina di Capo Tirone</i>
<i>MIKE</i>	<i>MIKE 21-3 Modello accoppiato FM</i>
<i>MK</i>	<i>Test di Mann-Kendall</i>
<i>R²</i>	<i>Coefficiente di correlazione</i>
<i>RMSE</i>	<i>Errore quadratico medio</i>
<i>RON</i>	<i>Rete nazionale italiana di misurazione delle onde marine</i>
<i>SBS</i>	<i>Sezione di confine verso il mare</i>
<i>SCI_CT</i>	<i>Area Marina Protetta di Capo Tirone</i>
<i>SD</i>	<i>Deviazione standard</i>
<i>SDI</i>	<i>Intervento di difesa costiera</i>
<i>SI</i>	<i>Indice di dispersione</i>
<i>SLR</i>	<i>Sea Level Rise, incremento del livello del mare</i>
<i>SON</i>	<i>Autunno (settembre – ottobre- novembre)</i>
<i>SSE</i>	<i>Stimatore di pendenza di Sen</i>
<i>SSP</i>	<i>Percorsi socio-economici Condivisi</i>
<i>SWH</i>	<i>Altezza d'onda significativa</i>
<i>T_m</i>	<i>Periodo medio dell'onda</i>
<i>T_p</i>	<i>Periodo di picco dell'onda</i>
<i>WAM</i>	<i>Modello WAve</i>
<i>W10</i>	<i>10 m Velocità del vento</i>
<i>θ</i>	<i>Direzione dell'onda</i>
<i>Vento</i>	<i>Direzione del vento</i>

Riferimenti Bibliografici

1. Aagaard, T.; Nielsen, J.; Jensen, S.G.; Friderichsen, J. Longshore sediment transport and coastal erosion at Skallingen, Denmark. *Geogr. Tidsskr.* 2004, 104, 5–14.
2. AAVV (2004) - Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale. Ed. Provincia di Cosenza.
3. Albarakati, A.M.A.; Aboobacker, V.M. Wave transformation in the nearshore waters of Jeddah, west coast of Saudi Arabia. *Ocean Eng.* 2018, 163, 599–608.
4. Anastasiou, K.; Chan, C.T. Solution of the 2D shallow water equations using the finite-volume method on unstructured triangular meshes. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 1997, 24, 1225–1245.
5. Anderson, M. E., & Smith, J. M. (2014). Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation. *Coastal Engineering*, 83, 82-92.
6. Androulidakis, Y.S., Kombiadou, K.D., Makris, C.V., Baltikas, V.N., Krestenitis, Y.N.: Storm surges in the Mediterranean Sea: Variability and trends under future climatic condition, *Dyn. Atmos. Ocean.*, 71, 56–82, 2015.
7. Antonioli, F.; Anzidei, M.; Amorosi, A.; Presti, V.L.; Mastronuzzi, G.; Deiana, G.; De Falco, G.; Fontana, A.; Fontolan, G.; Lisco, S.; et al. Sea-level rise and potential drowning of the Italian coastal plains: Flooding risk scenarios for 2100. *Quat. Sci. Rev.* 2017, 158, 29–43.
8. Argnani, A. & Trincardi, F. (1993) - Growth of a slope ridge and its control on sedimentation: Paola slope basin (eastern Tyrrhenian margin). In: Frostick, L. E., & Steel, R. J., eds., *Tectonic Controls*

- and Signatures in Sedimentary Successions, International Association of Sedimentologists, Special Publication, 20: 467-480.*
9. *Armstrong, J.S. and Green, K.C.: Forecasting Dictionary. The Wharton School, University of Pennsylvania, 2012.*
 10. *Asano, T. (1988). Wave damping characteristics due to seaweed. In Proc. 35th Conf. on Coastal Engrg., 1988.*
 11. *Attlee, H. (2015) - The Land Where Lemons Grow: The Story of Italy and its Citrus Fruit. Penguin Books*
 12. *Barbier E.B., Hacker S.D., Kock E.W., Stier A.C. & Silliman B.R. (2011) - The value of estuarine and coastal ecosystem services. Ecol. Monogr., 81 (2): 169-193*
 13. *Barone A., Fabbri A., Rossi S. & Sartori R. (1982) - Geological structure and evolution of the marine areas adjacent to the Calabrian arc. Earth Evolution Sciences, 3: 207-221.*
 14. *Battjes, J.A.; Janssen, J.P.F.M. Energy loss and Set-up due to breaking of random waves. Coast. Eng. 1978, 569-587.*
 15. *Beck, U.: La società del rischio. In Verso una Seconda Modernità, Carocci: Rome, Italy, ISBN 9788843068142, 2013.*
 16. *Bellafiore, D.; Bucchignani, E.; Gualdi, S.; Carniel, S.; Djurdjevic, V.; Umgiesser, G. Assessment of meteorological climate models as inputs for coastal studies. Ocean Dyn. 2012, 62, 555-568.*
 17. *Benassai E. (1998) - La protección de la costa en el equilibrio con el ambiente. La situación italiana. Revista Digital del Cedex, (112): 91-91.*
 18. *Bencivenga, M.; Nardone, G.; Ruggiero, F.; Calore, D. The Italian Data Buoy Network (RON). WIT Trans. Eng. Sci. 2012, 74, 305.*
 19. *Bendonni M., Mel R., Solari L., Lanzoni, S., Francalanci S. & Oumeraci H. (2016) - Insights into lateral marsh retreat mechanism*

- through localized field measurements. *Water Resources Res.*, 52: 1446-1464. <https://doi.org/10.1002/2015WR017966>.
20. Bondoni, M.; Mel, R.; Solari, L.; Lanzoni, S.; Francalanci, S.; Oumeraci, H. Insights into lateral marsh retreat mechanism through localized field measurements. *Water Resour. Res.* 2016, 52, 1446–1464.
21. Benvenuto R. (2019) - *La vita di San Francesco di Paola*. Rubbettino Editore.
22. Besio, G., Briganti, R., Romano, A., Mentaschi, L., and De Girolamo, P.: Time clustering of wave storms in the Mediterranean Sea, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 505–514, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-505-2017>, 2017.
23. Bijlsma, L., Hillen, R., & Misdorp, R. (1993). Changing coastal zones; chances for sustainable development. In *Proceedings Coastal Zone*.
24. Board, M. *Beach Nourishment and Protection*; Press, N.A., Ed.; National Academies Press: Washington, DC, USA, 1995; Volume 63.
25. Boccalaro F., Cinelli F., Rende F., Burgassi M., Zanella M. (2008) -*Ingegneria naturalistica. Il ripristino delle praterie di Posidonia oceanica. Un mare di piante*. ACER, 6/2008 : 57-61.
26. Boccalaro, F., & Cantasano, N. (2012). *Posidonia oceanica per la difesa delle coste sabbiose. Ovvero come difendere il litorale con l'aiuto delle fanerogame marine*. *Geologia dell'ambiente*, 20(3), 8-17.
27. Bolanos-Sanchez, R.; Sanchez-Arcilla, A.; Cateura, J. Evaluation of two atmospheric models for wind-wave modelling in the NW Mediterranean. *J. Mar. Syst.* 2007, 65, 336–353.
28. Booij, N., Holthuijsen, L.H., and Ris, R.C.: *The "Swan" wave model for shallow water*. *Coastal Eng.*, 53, 668 – 676, 1996.

29. Booij, N., Ris, R.C., and Holthuijsen, L.H.: *A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(4):7649-7666, doi: 10.1029/98JC02622, 1999.
30. Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H. *A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. J. Geophys. Res.-Ocean.* 1999, 104, 7649–7666.
31. Bossolasco, M. (1952). *La brezza di mare a Genova ed in altre località costiere italiane. Geofisica pura e applicata*, 21, 169-181.
32. Bossolasco, M. *L'Erosione del litorale di Belvedere Marittimo. Geofis. Pura Appl.* 1939, 1, 47–51.
33. Boudouresque, C.F.; Pergent, G.; Pergent-Martini, C.; Ruitton, S.; Thibaut, T.; Verlaque, M. *The necromass of the Posidonia oceanica seagrass meadow: Fate, role, ecosystem services and vulnerability. Hydrobiologia* 2016, 781, 25–42.
34. Boudouresque C.F., Meinesz A. (1982) -*Découverte de l'herbier de Posidonie. Parc National de Port-Cros, Parc Naturel Regional de la Corse, Cahiers*, 4, pp. 79.
35. Bower, B. T., Ehler, C. N., & Basta, D. J. (1994). *A framework for planning for integrated coastal zone management. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service [Office of Ocean Resources Conservation and Assessment]*.
36. Bründl, M. and Rickli, C.: *The storm Lothar 1999 in Switzerland – an incident analysis, For. Snow Landsc. Res.*, 77, 207– 216, <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:15318>(last access: 10 July 2021), 2002.

37. Bulleri, F.; Chapman, M.G. *The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments*. *J. Appl. Ecol.* 2010, 47, 26–35.
38. Callaghan, D.; Ranasinghe, R.; Nielsen, P.; Larson, M.; Short, A. *Process-determined coastal erosion hazards*. *Proc. Coast. Eng. Conf.* 2009, 5, 4227–4236.
39. Caloiero T., Buttafuoco G., Coscarelli R. & Ferrari E. (2015), - *Spatial and temporal characterization of climate at regional scale using homogeneous monthly precipitation and air temperature data: an application in Calabria (southern Italy)*. *Hydrology Research*, 46 (4): 629-646.
40. Caloiero T., Callegari G., Cantasano N., Coletta V., Pellicone G. & Veltri A. (2016) - *Bioclimatic analysis in a region of southern Italy (Calabria)*. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 150 (6): 1282-1295.
41. Caloiero, T.; Aristodemo, F.; Algieri-Ferraro, D. *Changes of Significant Wave Height, Energy Period and Wave Power in Italy in the Period 1979–2018*. *Environ. Sci. Proc.* 2020, 2, 3.
42. Caloiero, T.; Aristodemo, F.; Algieri-Ferraro, D. *Trend analysis of significant wave height and energy period in southern Italy*. *Theor. Appl. Climatol.* 2019, 138, 917–930.
43. Campagne, C.S.; Salles, J.M.; Boissery, P.; Deter, J. *The seagrass *Posidonia oceanica*: Ecosystem services identification and economic evaluation of goods and benefits*. *Mar. Pollut. Bull.* 2014, 97, 391–400.
44. Campos, R.M.; Alves, J.H.G.M.; Soares, C.G.; Guimaraes, L.G.; Parente, C.E. *Extreme wind-wave modeling and analysis in the south Atlantic Ocean*. *Ocean Model.* 2018, 124, 75–93.

45. Cantasano, N. *Posidonia oceanica per la difesa degli ambienti*. In *Proceedings of the SOS Dune, Roma, Italy, 23 October 2009*; pp. 170–183.
46. Cantasano, N.; Pellicone, G.; Ietto, F. *Integrated coastal zone management in Italy: A gap between science and policy*. *J. Coast. Conserv.* 2017, 21, 317–325.
47. Capra A., Consoli S. & Scicolone B. (2013) - *Long-Term Climatic Variability in Calabria and Effects on Drought and Agrometeorological Parameters*. *Water Resour. Manage.*, 27: 601-617 <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0204-0>.
48. Casas-Prat, M. and Sierra, J. P.: *Trend analysis of wave storminess: wave direction and its impact on harbour agitation*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 2327–2340, <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2327-2010>, 2010.
49. Cavaleri, L.; Bertotti, L. *Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas*. *Tellus A Dyn. Meteorol. Oceanogr.* 2004, 56, 167–175.
50. CERC (Coastal Engineering Research Center) (1984) - *Shore Protection Manual*. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
51. Chapman, D.C. *Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model*. *J. Phys. Oceanogr.* 1985, 15, 1060–1075.
52. Cicin-Sain, B., Knecht, R. W., Knecht, R., Jang, D., & Fisk, G. W. (1998). *Integrated coastal and ocean management: concepts and practices*. Island press
53. Coelho, C.; Narra, P.; Marinho, B.; Lima, M. *Coastal Management Software to Support the Decision-Makers to Mitigate Coastal Erosion*. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020, 8, 37.

54. Conte, D.; Lionello, P. Storm surge distribution along the Mediterranean coast: Characteristics and evolution. *Procedia-Soc. Behav. Sci.* 2014, 120, 110–115.
55. Corenblit, D.; Tabacchi, E.; Steiger, J.; Gurnell, A.M. Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. *Earth Sci. Rev.* 2007, 84, 56–86.
56. Cortemiglia G.C. (1981) - Segnalazione di crioturbazioni nei depositi costituenti il terrazzo «Fluviale recente» a Tortona (Piemonte). *Geogr. Fis. Dinam. Quat*, 4: 75-86.
57. Cortese S. (1895) - *Descrizione Geologica della Calabria*. Regio Ufficio Geologico, Memoria descrittiva. *Carta Geologica d'Italia*, Vol IX, 310 pp, Roma
58. Coscarelli R.A. & Caloiero T. (2012) - Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria region). *Journal of Hydrology*, 416: 145-156.
59. Costanza, R.; D'Arge, R.; Groot, R.; Farberk, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R.; Paruelo, J.; et al. *The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital*. *Nature* 1997, 387, 253–260.
60. Crain, C.M.; Halpern, B.S.; Beck, M.W.; Kappel, C.V. *Understanding and managing human threats to the coastal marine environment*. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2009, 1162, 39–62.
61. Critelli S. & Le Pera E. (1998) - Post-Oligocene sediment-dispersal systems and unroofing history of the Calabrian microplate, Italy. *International Geology Review*, 40: 609-637.
62. D'Alpaos, L. and Defina, A.: *Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and*

- applications to the Venice lagoon. Comput Geosci 33(4):476{496, DOI 10.1016/j.cageo.2006.07.009, 2007.*
63. Danish Hydraulics Institute (DHI). MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM—Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation; DHI, Ed.; DHI: Hørsholm, Denmark, 2017.
 64. Danish Hydraulics Institute (DHI). MIKE 21 Sand Transport Module, Scientific Documentation; DHI, Ed.; DHI: Hørsholm, Denmark, 2017.
 65. Danish Hydraulics Institute (DHI). MIKE 21 Spectral Wave Module, Scientific Documentation; DHI, Ed.; DHI: Hørsholm, Denmark, 2017.
 66. Dare, J.L. *Alternative Shore Protection Strategies: Innovative Options and Management Issues. Master's Thesis, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Corvallis, OR, USA, 2003; p. 97333.*
 67. Davies A.M. & Flather R.A. (1977) - *Computation of the storm surge of 1 to 6 April 1973 using numerical models of the North West European continental shelf and the North Sea. Deutsch. Hydrogr. Z., 30: 139-162.*
 68. Davolio, S.; Miglietta, M.M.; Moscatello, A.; Pacifico, F.; Buzzi, A.; Rotunno, R. *Numerical forecast and analysis of a tropical-like cyclone in the Ionian Sea. Nat. Hazard. Earth Syst. Sci. 2009, 9, 551–562.*
 69. De Falco, G.; Molinaroli, E.; Baroli, M.; Bellacicco, S. *Grain size and compositional trends of sediments from Posidonia oceanica meadows to beach shore, Sardinia, western Mediterranean. Estuar. Coast. Shelf Sci. 2003, 58, 299–309.*
 70. De Leo, F.; De Leo, A.; Besio, G.; Briganti, R. *Detection and quantification of trends in time series of significant wave heights: An*

application in the Mediterranean. Sea Ocean Eng. 2020, 202, 107155.

71. De Ritis R., Pepe, F., Orecchio B., Casalbore D., Bosman A., Chiappini M., Chiocci F., Corradino M., Nicolich R., Martorelli E., Monaco C., Presti D. & Totaro C. (2019) - Magmatism along lateral slab edges: Insights from the Diamante-Enotrio-Ovidio volcanic-intrusive complex (Southern Tyrrhenian Sea). *Tectonics*, 38, doi.org/10.1029/2019TC005533.
72. de Ruig, J.H.M.; Roelse, P. A feasibility study of a perched beach concept in the Netherlands. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy, 4–9 October 1992*; pp. 2581–2598.
73. De Zolt, S., Lionello, P., Nuhu, A., and Tomasin, A.: The disastrous storm of 4 November 1966 on Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 861–879, doi:10.5194/nhess-6-861-2006, 2006.
74. Dean, R.G. *Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications*. *J. Coast. Res.* 1991, 7, 53–84.
75. Defina, A., D'Alpaos, L., and Matticchio, B.: A new set of equations for very shallow water and partially dry areas suitable to 2D numerical models. In: Molinaro P, Natale L (eds) *Model. Flood Propag. Over Initial. Dry Areas*, American Soc. of Civil Eng., New York, pp 72-81, 1994
76. Defina, A.: Numerical experiments on bar growth. *Water Resour Res* 39(4):1-12, DOI 10.1029/2002WR001455, 2003.
77. Defina, A.: Two-dimensional shallow equations for partially dry areas. *Water Resour Res* 36(11):3251, DOI 10.1029/2000WR900167, 2000.

78. Dewall, A. E.: *Beach Changes at Westhampton Beach, New York*; MR 79-5, Coastal Engineering Research Centre, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1979.
79. Drejza S., Pascal B., Guillaume M. & Friesinger S. (2019) - *Quantifying road vulnerability to coastal hazards: Development of a synthetic index. Ocean & Coastal Management. Doi: 10.1016/j.ocecoaman.2019.104894.*
80. Dugan, J. E., Aioldi, L., Chapman, M. G., Walker, S. J., Schlacher, T., Wolanski, E., & McLusky, D. (2011). *8.02-Estuarine and coastal structures: environmental effects, a focus on shore and nearshore structures. Treatise on estuarine and coastal science, 8, 17-41.*
81. Edelman, T.: *Dune Erosion During Storm Conditions; Proceedings of the Thirteenth International Conference on Coastal Engineering, pp 1305-1312, 1972.*
82. Ekebjærg, L.; Justesen, P. *An explicit scheme for advection-diffusion modelling in two dimensions. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 1991, 88, 287–297.*
83. Eldeberky, Y.; Battjes, J.A. *Spectral modeling of wave breaking: Application to Boussinesq equations. J. Geophys. Res. 1996, 101, 1253–1264.*
84. Elfrink, B.; Brøker, I.; Deigaard, R.; Asp Hansen, E.; Justesen, P. *Modelling of 3D sediment transport in the surf zone. Coast. Eng. 1996, 3805–3817.*
85. Erdik, T.; Beji, S. *Wave climate in the sea of Marmara. In Oil Spill Along the Turkish Straits Sea Area; Turkish Marine Research Foundation: Istanbul, Turkey, 2018.*
86. Ertör, I.; Hadjimichael, M. *Editorial: Blue degrowth and the politics of the sea: rethinking the blue economy. Sustain. Sci. 2020, 15, 1–10.*

87. EUROSION. *Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability—Part I—Major Findings and Policy Recommendations of the EUROSION Project*. 2004. Available online: <http://www.euroSION.org/reports-online/part1.pdf> (accessed on 18 September 2020).
88. Fabbri, K. P. (1998). *A methodology for supporting decision making in integrated coastal zone management*. *Ocean and Coastal Management* 39, 51–62.
89. Fairley, I.; Williams, H.; Horrillo-Caraballo, J.; Thompson, I.; Masters, I.; Reeve, D.; Karunaratna, H.; Faraggiana, E.; Thompson, D. *An analysis of the wave climate in South Wales*. In *Proceedings of the 12th European Wave and Tidal Energy Conference, Cork, Ireland, 27 August–1 September 2017*.
90. Faraci, C.; Scandura, P.; Foti, E. *Evolution of a perched nourished beach: Comparison between field data and numerical results*. In *Proceedings of the 34th Conference on Coastal Engineering, Seoul, Korea, 15–20 June 2014*.
91. Federico, S.; Bellecci, C. *Sea storms hindcast around Calabrian coasts: Seven cases study*. *Il Nuovo Cim. C* 2004, 2, 179–203.
92. Federico, S.; Lo Feudo, T.; Bellecci, C.; Arena, F. *Impact of wind field horizontal resolution on sea waves hindcast around Calabrian coasts*. *Il Nuovo Cim. C* 2006, 29, 147–165.
93. Fedorov, G.M.; Kuznetsova, T.Y.; Razumovskii, V.M. *How the proximity of the sea affects development of economy and the settlement pattern in Kaliningrad oblast*. *Reg. Res. Russ.* 2017, 7, 352–362.
94. Ferrario, F.; Beck, M.W.; Storlazzi, C.D.; Micheli, F.; Shepard, C.C.; Airoidi, L. *The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation*. *Nat. Commun.* 2014, 5, 3794.

95. Finotello, A.; Marani, M.; Carniello, L.; Pivato, M.; Roner, M.; Tommasini, L.; D'alpaos, A. Control of wind-wave power on morphological shape of salt marsh margins. *Water Sci. Eng.* 2020, 13, 45–56.
96. Frederikse, T., Landerer, F., Caron, L., Adhikari, S., Parkes, D., Humphrey, V.W., Dangendorf, S., Hogarth, P., Zanna, L., Cheng, L., and Wu, Y.H.: The causes of sea-level rise since 1900. *Nature*, 584 (7821), 393–397. doi:10.1038/s41586-020-2591-3, 2020.
97. Gaeta, M.G., Bonaldo, D., Samaras, A.G., Carniel, S., Archetti, R.: Coupled Wave-2D Hydrodynamics Modeling at the Reno River Mouth (Italy) under Climate Change Scenarios, *Water*, 10, 1380. <https://doi.org/10.3390/w10101380>, 2018.
98. Galanis, G.; Hayes, D.; Zodiatis, G.; Chu, P.C.; Kuo, Y.H.; Kallos, G. Wave height characteristics in the Mediterranean Sea by means of numerical modeling, satellite data, statistical and geometrical techniques. *Mar. Geophys. Res.* 2012, 33, 1–15.
99. Garcia-Medina, G., Yang, Z., Wu, W., and Wang, T.: Wave resource characterization at regional and nearshore scales for the U.S. Alaska coast based on a 32-year high-resolution hindcast. *Renew. Energy*, 170, 595–612, 2021.
100. Gedan K.B., Silliman B.R. & Bertness M.D. (2009) - Centuries of human-driven change in saltmarsh ecosystems. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 1, 117–141.
101. Gedan, K.B.; Silliman, B.R.; Bertness, M.D. Centuries of human-driven change in saltmarsh ecosystems. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2009, 1, 117–141.
102. Giorgi, F.; Bi, X.; Pal, J. Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: Climate change scenarios (2071–2100). *Clim. Dyn.* 2004, 23, 839–858.

- 103.** Gippius, F.; Myslenkov, S.A. *Black Sea's wind wave climate with a focus on coastal regions.* *Ocean. Eng.* 2020, 218, 108199.
- 104.** Gobert, S.; Cambridge, M.L.; Velimirov, B.; Pergent, G.; Lepoint, G.; Bouquegneau, J.M.; Dauby, P.; Pergent-Martini, C.; Walker, D.I. *Biology of Posidonia. In Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2006; pp. 387–408. ISBN 1402029837.*
- 105.** Goda, Y. *Re-analysis of Laboratory Data on Wave Transmission over Breakwaters; The Port and Harbour Research Institute: Yokosuka, Japan, 1969; Volume 8.*
- 106.** Goda, Y.; Ahrens, J.P. *New formulation of wave transmission over and through low-crested structures.* *Coast. Eng.* 2009, 5, 3530–3541.
- 107.** Goda, Y.; Takeda, H. *Laboratory Investigation on Wave Transmission over Breakwater; The Port and Harbour Research Institute: Yokosuka, Japan, 1967; Volume 8.*
- 108.** González, M.; Medina, R.; Losada, M.A. *Equilibrium beach profile model for perched beaches.* *Coast. Eng.* 1999, 36, 343–357.
- 109.** González, M.; Medina, R.; Losada, M.A. *Equilibrium beach profile model for perched beaches.* *Coast. Eng.* 1999, 36, 343–357.
- 110.** Guidetti, P.; Fabiano, M. *The use of lepidochronology to assess the impact of terrigenous discharges on the primary leaf production of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*.* *Mar. Pollut. Bull.* 2000, 40, 449–453.
- 111.** Haktanir, T.; Citakoglu, H. *Trend, Independence, Stationarity, and Homogeneity Tests on Maximum Rainfall Series of Standard Durations Recorded in Turkey.* *J. Hydrol. Eng.* 2014, 19, 05014009.

112. Hamza, W.; Tomasicchio, G.R.; Ligorio, F.; Lusito, L.; Francone, A. *A Nourishment Performance Index for Beach Erosion/Accretion at Saadiyat Island in Abu Dhabi*. *J. Mar. Sci. Eng.* 2019, 7, 173.
113. Hersbach, H.; de Rosnay, P.; Bell, B. *Operational global reanalysis: Progress, future directions and synergies with NWP*. *Re-Anal. Proj. Rep. Ser.* 2018, 27, 1–63.
114. Hersbach, H.; Dee, D. *ERA5 Reanalysis Is in Production*; ECMWF Newsletter; ECMWF: Reading, UK, 2016.
115. Holthuijsen, L.H., Booij, N., and Ris, R.C.: *A spectral wave model for the coastal zone*, 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, Louisiana, July 25-28, 1993, New York, pp. 630-641, 1993.
116. Houston, J.R. *Beach-fill design*. In *Advances in Coastal and Ocean Engineering*; Philip, L., Liu, F., Eds.; World Scientific: Singapore, 1996; pp. 199–229.
117. Huang, W. *The Influence of Cruise Tourism Dining Waste on the Process of Self-recovery of Natural Ecological Environment*. 2019, 28, 49–54.
118. Hur, D.S.; Lee, W.D.; Cho, W.C.; Jeong, Y.H.; Jeong, Y.M. *Rip current reduction at the open inlet between double submerged breakwaters by installing a drainage channel*. *Ocean. Eng.* 2019, 193, 106580.
119. IPCC, 2013. *Annex II: climate system scenario tables*. In: Prather, M., Flato, G., Friedlingstein, P., Jones, C., Lamarque, J.-F., Liao, H., and Rasch, P. (Eds.), *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge,

120. Jawahar, P.; Kamath, H. *A High-Resolution Procedure for Euler and Navier-Stokes Computations on Unstructured Grids*. *J. Comput. Phys.* 2000, 164, 165–203.
121. Jena, B.K.; Rajkumar, J.; Avula, A.; Jossia, K.; Murthy, M. *Simulated wave climate and variability over the North Indian Ocean*. *Curr. Sci.* 2020, 118, 11.
122. Johannsen, F.; Ermida, S.; Martins, J.; Trigo, I.F.; Nogueira, M.; Dutra, E. *Cold bias of ERA5 summertime daily maximum land surface temperature over Iberian Peninsula*. *Remote Sens.* 2019, 11, 2570.
123. Jorve, J.; Kordas, R.; Anderson, K.; Nelson, J.; Picard, M.; Harley, C. *Climate Change: Coastal Marine Ecosystems*. *Encycl. Nat. Resour. Air* 2014.
124. Katoh, K. and Yanagishima, S.: *Predictive Model for Daily Changes of Shoreline, Proceedings of the Twenty-First International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, Hamburg, Chapter 93, pp 1253- 1264, 1988.*
125. KC, S., and Lutz, W.: *The human core of the shared socioeconomic pathways: population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100*. *Global Environ. Change* 42, 181-192, 2015.
126. Kendall, M.G. *Rank Correlation Methods*; Oxford University Press: New York, NY, USA, 1975.
127. Kirwan M. L., Guntenspergen G.R., D’Alpaos A., Morris J.T., Mudd S.M. & Temmermann S. (2010) - *Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level*. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L23401. Doi:10.1029/2010GL045489.

128. Klein-Tank, A.M.G.; Können, G.P. Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe 1946–99. *J. Clim.* 2003, 16, 3665–3680.
129. Komen, G.J.; Cavaleri, L.; Doneland, M.; Hasselmann, K.; Hasselmann, S.; Janssen, P.A.E.M. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*; Cambridge University Press: New York, NY, USA, 1994; ISBN 0-521-47047-1.
130. Kortekaas, S. and Dawson, A.G.: Distinguishing tsunami and storm deposits: an example from Martinhal, SW Portugal. *Sedimentary Geology* 200, 208–221, 2007
131. Kriebel, D.L.; Dean, R.G. Numerical Simulation of Time-Dependent Beach and Dune Erosion. *Coast. Eng.* 1985, 9, 221–245.
132. Kundzewicz, Z.W.; Robson, A. 2000 Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. *World Climate Program Data and Monitoring*. WMO/TD-No. 1013.
133. Łabuz, T.A.: Environmental Impacts—Coastal Erosion and Coastline Changes. In: The BACC II Author Team (eds) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Regional Climate Studies*. Springer, Cham. 590 https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1_20, 2015.
134. Łabuz, T.A.: Environmental Impacts—Coastal Erosion and Coastline Changes. In: The BACC II Author Team (eds) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Regional Climate Studies*. Springer, Cham. 590 https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1_20, 2015.
135. Lamine, I.; Alla, A.A.; Bourouache, M.; Moukrim, A. Monitoring of physicochemical and microbiological quality of Taghazout seawater (Southwest of Morocco): Impact of the new tourist resort “Taghazout bay.” *J. Ecol. Eng.* 2019, 20, 79–89.

136. Lario, J., Luque, L., Zazo, C., Goy, J.L., Spencer, C., Cabero, A., Bardají, T., Borja, F., Dabrio, C.J., Civis, J., González Delgado, J.A., Borja, C., and Alonso-Azcárate, J.: *Tsunami vs. storm surge deposits: a review of the sedimentological and geomorphological records of extreme wave events (EWE) during the Holocene in the Gulf of Cadiz, Spain*. *Zeitschrift für Geomorphologie* 54 (Suppl. 3), 301–316, 2010.
137. Lee, Y.H.; Shindell, D.T.; Faluvegi, G.; Pinder, R.W. *Potential impact of a US climate policy and air quality regulations on future air quality and climate change*. *Atmos. Chem. Phys.* 2016, 16, 5323–5342.
138. Leibowitz Y. (2010) - *Le feste ebraiche*. A cura di Alborghetti P. Jaca Book.
139. Li, X.; Zhang, W. *3D numerical simulation of wave transmission for low-crested and submerged breakwaters*. *Coast. Eng.* 2019, 152, 103517.
140. Lionello P. (2005) - *Extreme surges in the Gulf of Venice, Present and Future Climate, in Venice and its lagoon*. Edited by: Fletcher C. & Spencer T., *State of Knowledge Cambridge University Press*, Cambridge UK, 59-65
141. Lionello, P.; Sanna, A. *Mediterranean wave climate variability and its links with NAO and Indian Monsoon*. *Clim. Dyn.* 2005, 25, 611–623.
142. Liqueste, C.; Zulian, G.; Delgado, I.; Stips, A.; Maes, J. *Assessment of coastal protection as an ecosystem service in Europe*. *Ecol. Indic.* 2013, 30, 205–217.
143. Lo Feudo, T., Mel, R. A., Sinopoli, S., & Maiolo, M. (2022). *Wave Climate and Trends for the Marine Experimental Station of*

- Capo Tirone Based on a 70-Year-Long Hindcast Dataset. Water, 14(2), 163.*
- 144.** Loinenak, F.A.; Hartoko, A.; Muskananfola, M.R. Mapping of coastal vulnerability using the coastal vulnerability index and geographic information system. *Int. J. Technol.* 2015, 6, 819–827.
- 145.** Loucks, D. P. (1987). *Water quality: economic modeling.* In *Economic-Ecological Modeling* (L. C. Bratt and W. F. J. van Lierop, eds), pp. 135–148. Amsterdam: North-Holland.
- 146.** Lowe J.A. & Gregory J.M. (2008) - The effect of climate change on storm surges around the United Kingdom. *Phil. Trans. R. Soc.*, 363: 131-1328. Doi: 10.1098/rsta.2005.1570.
- 147.** Luijendijk, A.; Hagenaars, G.; Ranasinghe, R.; Baart, F.; Donchyts, G.; Aarninkhof, S. *The State of the World's Beaches. Sci. Rep.* 2018, 8, 6641.
- 148.** Maiolo M., Mel R.A. & Sinopoli S. (2020c) - A Stepwise Approach to Beach Restoration at Calabaia Beach. *Water*, 12, 2677.
- 149.** Maiolo, M., Carini, M., Pantusa, D., Capano, G., Bonora, M. A., Feudo, T. L., Sinopoli, S., & Mel, R. A. (2020b). History and heritage of coastal protection in the southern Tyrrhenian area. *Italian journal of engineering geology and environment*, (2), 19-30.
- 150.** Maiolo, M., Mel, R. A., & Sinopoli, S. (2020a). A Simplified Method for an Evaluation of the Effect of Submerged Breakwaters on Wave Damping: The Case Study of Calabaia Beach. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(7), 510.
- 151.** Maiolo, M.; Versace, P.; Natale, L.; Irish, J.; Pope, J.; Frega, F. A comprehensive study of the tyrrhenian shoreline of the Province of Cosenza. In *Proceedings of the Giornate Italiane di Ingegneria*

Costiera V Edizione (AIPCN 2000), Reggio Calabria, Italy, 11–13 October 2000.

152. Mann, H.B. *Nonparametric tests against trend. Econometrica* 1945, 13, 245–259.
153. Manzanera, M., Pérez, M., & Romero, J. (1998). *Seagrass mortality due to oversedimentation: an experimental approach. Journal of coastal conservation, 4, 67-70.*
154. Mariano, C., Marino, M., Pisacane, G., and Sannino, G.: *Sea Level Rise and Coastal Impacts: Innovation and Improvement of the Local Urban Plan for a Climate-Proof Adaptation Strategy. Sustainability* 13, 1565. <https://doi.org/10.3390/su13031565>, 2021.
155. Mariotti, G., Fagherazzi, S., Wiberg, P., McGlathery, K., Carniello, L., and Defina, A.: *Influence of storm surges and sea level on shallow tidal basin erosive processes, J. Geophys. Res.-Oceans, 115, C11012, https://doi.org/10.1029/2009JC005892, 2010, 2010.*
156. Martin, D.; Bertasi, F.; Colangelo, M.A.; de Vries, M.; Frost, M.; Hawkins, S.J.; Macpherson, E.; Moschella, P.S.; Satta, M.P.; Thompson, R.C.; et al. *Ecological impact of coastal defence structures on sediment and mobile fauna: Evaluating and forecasting consequences of unavoidable modifications of native habitats. Coast. Eng. 2005, 52, 1027–1051.*
157. Martini, P., Carniello, L., and Avanzi, C.: *Two dimensional modelling of flood flows and suspended sediment transport: the case of the Brenta River, Veneto (Italy). Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 4, 165–181. https://doi.org/10.5194/nhess-4-165-2004, 2004.*
158. Maruca G., Laghetti G. & Hammaer K. (2015) - *Religious and Cultural Significance of the Citron (Citrus medica L. 'Diamante') from Calabria (South Italy): A Biblical Fruit of the Mediterranean Land. Journal of Environmental Science and*

Engineering A 4 (2015) 203-209. Doi 10.17265/2162-5298/2015.04.006.

- 159.** Mase, H. (1989). *Random wave runup height on gentle slope. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(5), 649-661.
- 160.** Masselink, G., & Lazarus, E. D. (2019). *Defining coastal resilience. Water*, 11(12), 2587.
- 161.** Mel R. & Lionello P. (2016) - *Probabilistic dressing of a storm surge prediction in the Adriatic Sea. Adv. Meteorol.* 8. <https://doi.org/10.1155/2016/3764519>. Article ID 3764519.
- 162.** Mel R. & Lionello P. (2014) - *Storm surge ensemble prediction for the city of Venice. Weather Forecast* 29:1044–1057. Doi:10.1175/WAF-D-13-00117.1
- 163.** Mel R., Carniello L. & D'Alpaos L. (2019) - *Addressing the effect of the Mo.S.E. barriers closure on wind setup within the Venice lagoon, Estuarine. Coastal and Shelf Science* 225. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106249>.
- 164.** Mel R., Sterl A. & Lionello P. (2013) - *High resolution climate projection of storm surge at the Venetian coast. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 1135–1142. 2013. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1135-2013>.
- 165.** Mel, R. A., Lo Feudo, T., Miceli, M., Sinopoli, S., & Maiolo, M. (2022). *A coupled modelling system to assess the effect of Mediterranean storms under climate change. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-31.
- 166.** Mel, R., Carniello, L., Viero, D. P., Defina, A., and D'Alpaos, L.: *The first operations of Mo.S.E. system to prevent the flooding of Venice: Insights on the hydrodynamics of a regulated lagoon, Estuar.*

- Coast. Shelf S.*, 261, 107547,
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107547>, 2021.
- 167.** Mel, R.: *Exploring the partial use of the Mo.S.E. system as effective adaptation to rising flood frequency of Venice*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 3629–3644, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3629-2021>, 2021.
- 168.** Mel, R.; Carniello, L.; D’Alpaos, L. *Addressing the effect of the Mo.S.E. barriers closure on wind setup within the Venice lagoon*. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2019, 225, 106249.
- 169.** Mel, R.; Carniello, L.; D’Alpaos, L. *How long the Mo. S.E. barriers will be effective in protecting all the urban settlements in the Venice lagoon? The wind setup constraint*. *Coast. Eng.* 2021, 168, 103923.
- 170.** Mel, R.; Lionello, P. *Storm surge ensemble prediction for the city of Venice*. *Weather Forecast.* 2014, 29, 1044–1057.
- 171.** Mel, R.; Sterl, A.; Lionello, P. *High resolution climate projection of storm surge at the Venetian coast*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2013, 13, 1135–1142.
- 172.** Mel, R.A.; Viero, D.P.; Carniello, L.; D’Alpaos, L. *Multipurpose use of artificial channel networks for flood risk reduction: The case of the waterway Padova–Venice (Italy)*. *Water* 2020, 12, 1609.
- 173.** Mele, B.H.; Russo, L.; D’Alelio, D. *Combining marine ecology and economy to roadmap the integrated coastal management: A systematic literature review*. *Sustainability* 2019, 11, 4393.
- 174.** Miglietta, M.M.; Laviola, S.; Malvaldi, A.; Conte, D.; Levizzani, V.; Price, C. *Analysis of tropical-like cyclones over the Mediterranean Sea through a combined modeling and satellite approach*. *Geophys. Res. Lett.* 2013, 40, 2400–2405.

175. Morton, R.A. and Sallenger A. H.: *Morphological Impacts of Extreme Storms on Sandy Beaches and Barriers*, *J. Coast. Res.*,19(3), 560–573, 2003.
176. Morton, R.A., Gelfenbaum, G., Buckley, M.L., and Richmond, B.M.: *Geological effects and implications of the 2010 tsunami along the central coast of Chile*. *Sedimentary Geology* 242 (1–4), 34–51, 2011.
177. Mulligan, R.P.; Bowen, A.J.; Hay, A.E.; van der Westhuysen, A.J.; Battjes, J.A. *Whitecapping and wave field evolution in a coastal bay*. *J. Geophys. Res.-Ocean.* 2008, 113.
178. Munoz-Perez, J.J.; Tejedor, L.; Medina, R. *Equilibrium beach profile model for perched beaches*. *J. Coast. Eng.* 1999, 15, 950–957.
179. Murillo, J.; García-Navarro, P. *An Exner-based coupled model for two-dimensional transient flow over erodible bed*. *J. Comput. Phys.* 2010, 229, 8704–8732.
180. Narayan, S.; Beck, M.W.; Reguero, B.G.; Losada, I.J.; Van, B.; Lange, M.; Burks-copes, K.A. *The Effectiveness, Costs and Coastal Protection Benefits of Natural and Nature- Based Defences*. *PLoS ONE* 2016, 11, e0154735.
181. Nayak, S.; Bhaskaran, P.K.; Venkatesan, R.; Dasgupta, S. *Modulation of local windwaves at Kalpakkam from remote forcing effects of Southern Ocean swells*. *Ocean. Eng.* 2013, 64, 23–35.
182. Nelson, R.C. *Depth limited design wave heights in very flat regions*. *Coast. Eng.* 1994, 23, 43–59.
183. Nelson, R.C. *Design wave heights on very mild slopes – An Experimental Study*. *Trans. Inst. Eng. Aust. Civ. Eng.* 1987, 3, 157–161.
184. Nesshöver, C.; Assmuth, T.; Irvine, K.N.; Rusch, G.M.; Waylen, K.A.; Delbaere, B.; Haase, D.; Jones-Walters, L.; Keune, H.; Kovacs,

- E.; et al. *The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective*. *Sci. Total Environ.* 2017, 579, 1215–1227.
185. Nogueira, M. *Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences*. *J. Hydrol.* 2020, 583, 124632.
186. Nuzula, N.I.; Armono, H.D.; Rosyid, D.M. *The Impact of Coastal Tourism Activities on Water Quality at Baluran National Park*. *Iptek (Surabaya)* 2017, 28, 59–62.
187. O'Neill, B., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K., Hallegatte, S., Carter, T., Mathur, R., and van Vuuren, D.: *A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways*. *Clim. Change* 122, 387–400, 2014
188. OECD. *Marine Protected Areas: Economics, Management and Effective Policy Mixes*; OECD Publishing: Paris, France, 2017.
189. OECD. *The Ocean Economy in 2030*; OECD Publishing: Paris, France, 2016. [Google Scholar]
190. Ondiviela, B., Losada, I. J., Lara, J. L., Maza, M., Galván, C., Bouma, T. J., & van Belzen, J. (2014). *The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate*. *Coastal Engineering*, 87, 158-168.
191. Ondiviela, B.; Losada, I.J.; Lara, J.L.; Maza, M.; Galván, C.; Bouma, T.J.; van Belzen, J. *The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate*. *Coast. Eng.* 2014, 87, 158–168.
192. *operation for river flood management: The case study of Padova (Italy)*. *J. Hydrol. Reg.* 2020, 30, 100702.
193. Orlandi, I. *A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows*. *J. Comput. Phys.* 1976, 21, 251–269.

- 194.** Paladini de Mendoza, F., Melchiorri, C., and Marcelli, M.: *Storm classification for Tyrrhenian Sea and wave conditions changes over last thirty years. Second Annual SISC (Italian Society of Climate Science), Venice, 2014.*
- 195.** PAN Life (2016) - *Programma Azione Natura 2000 (2006) - Report 2006 - Commissione Europea, Programma Life+. LIFE 13 NAT/IT/001075.*
- 196.** Parker, M., Thompson, J. G., Reynolds, R. R. and Smith, M. D. (1995). *Use and misuse of complex models: examples from water demand management. Water Resources Bulletin 31, 257–263.*
- 197.** Pasarić, M.; Orlic, M. *Meteorological forcing of the Adriatic: Present vs. projected climate conditions. Geofizika 2004, 21, 69–87.*
- 198.** Pattiaratchi, C., Olsson, D., Hetzel, Y., & Lowe, R. (2009). *Wave-driven circulation patterns in the lee of groynes. Continental Shelf Research, 29(16), 1961-1974.*
- 199.** Phillips, O.M.: *The dynamics of the upper ocean, 2nd edition, Cambridge University Press, 261-, 1977.*
- 200.** Placanica A. (1994) - *Storia della Calabria dall'antichità ai giorni nostri. Edizioni Donzelli, Roma.*
- 201.** Pomaro, A.; Cavaleri, L.; Lionello, P. *Climatology and trends of the Adriatic Sea wind waves: Analysis of a 37-year long instrumental data set. Int. J. Climatol. 2017, 37, 4237–4250.*
- 202.** Post, J.C.; Lundin, C.G. *Guidelines for Integrated Coastal Zone Management; The World Bank: Washington, DC, USA, 1996; Volume 9, ISBN 0821337351. [Google Scholar]*
- 203.** Pranzini E., Wetzel A. & Williams A. (2015) - *Aspects of coastal erosion and protection in Europe. Journal of Coastal Conservation 19(4). Doi: 10.1007/s11852-015-0399-3*

204. Pranzini, E.; Wetzel, A.; Williams, A. *Aspects of coastal erosion and protection in Europe*. *J. Coast. Conserv.* 2015, 19, 445–459.
205. Pulice I., Di Leo P., Robustelli G., Scarciglia F., Cavalcante F. & Belviso C. (2013) - *Control of climate and local topography on dynamic evolution of badland from southern Italy (Calabria)*. *Catena*, 109: 83-95.
206. Pytharoulis, I.; Craig, G.C.; Ballard, S.P. *The hurricane-like Mediterranean cyclone of January 1995*. *Meteorol. Appl.* 2000, 7, 261–279.
207. Rahimzadeh, A.; Ghadimi, P.; Feizi Chekab, M.A.; Jabbari, M.H. *Determining transmission coefficient of propagating solitary wave over trapezoidal breakwater and parametric studies on different influential factors*. *ISRN Mech. Eng.* 2014, 2014, 841327.
208. Rakocinski, C.F.; Heard, R.W.; LeCroy, S.E.; McLelland, J.A.; Simons, T. *Responses by macrobenthic assemblages to extensive beach restoration at Perdido Key, Florida, U.S.A.* *J. Coast. Res.* 1996, 12, 326–353.
209. Ramon, J.; Lledo, L.; Torralba, V.; Soret, A.; Doblas-Reyes, F.J. *What global reanalysis best represents near-surface winds?* *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2019, 145, 3236–3251.
210. Riahi, K. et al.: *The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview*, *Global Environmental Change* 42, 153-168, 2017.
211. Rinaldo, A., Nicotina, L., Alessi Celegon, E., Beraldin, F., Botter, G., Carniello, L., Cecconi, G., Defina, A., Settin, T., Uccelli, A., D'Alpaos, L., and Marani, M.: *Sea level rise, hydrologic runoff, and the flooding of Venice*. *Water Resour. Res.* 44, W12434, doi:10.1029/2008WR007195, 2008.

212. Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., and Booij, N.: *A spectral model for waves in the near shore zone*, 24th Int. Conf. Coastal Engng, Kobe, Oct. 1994, pp. 68-78 Rivas MR, Stoffelen A. (2019) *Characterizing ERA-interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT*. *Ocean Sci.* 15 831–52, 1994.
213. Rizkalla, C. E., & Savage, A. (2011). *Impact of seawalls on loggerhead sea turtle (Caretta caretta) nesting and hatching success*. *Journal of Coastal Research*, 27(1), 166-173.
214. Rodríguez-Ramírez, A., Pérez-Asensio, J.N., Santos, A., Jiménez-Moreno, G., Villarías-Robles, J.J.R., Mayoral, E., Celestino-Pérez, S., Cerrillo-Cuenca, E., López-Sáez, J.A., León, A., and Contreras, C.: *Atlantic extreme wave events during the last four millennia in the Guadalquivir Estuary. SW Spain*. *Quaternary Research* 83(1): 24–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.08.005>, 2015.
215. Roe, P.L. *Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes*. *J. Comput. Phys.* 1997, 135, 250–258.
216. Rubio, C.M. *A laboratory procedure to determine the thermal properties of silt loam soils based on ASTM D 5334*. *Appl. Ecol. Environ. Sci.* 2013, 1, 45–48.
217. Ruessink, B.G.; Walstra, D.J.R.; Southgate, H.N. *Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches*. *Coast. Eng.* 2003, 48, 139–149.
218. Ruíz, J.M.; Marín, A.; Calvo, J.F.; Ramírez-Díaz, L. *Interactions between a floodway and coastal constructions in Aguila bay (Southeastern Spain)*. *Ocean Coast. Manag.* 1993, 19, 241–262
219. Ruiz, J.M.; Romero, J. *Effects of disturbances caused by coastal constructions on spatial structure, growth dynamics and photosynthesis of the seagrass Posidonia oceanica*. *Mar. Pollut. Bull.* 2003, 46, 1523–1533.

220. Savaglio A. & Capalbo M. (2003) - *Fortissima Castra*.Ed.
Ecofutura.
221. Savaglio A. & Capalbo M. (2004) - *Mare Horribilis*.Ed.
Ecofutura.
222. Scarascia, L.; Lionello, P. *Global and regional factors contributing to the past and future sea level rise in the northern Adriatic Sea.*
Glob. Planet. Chang. 2013, 106, 51–63.
223. Seixas, C.S.; Davidson-hunt, I.; Kalikoski, D.C.; Davy, B.;
Berkes, F.; de Castro, F.; Medeiros, R.P.; Minte-vera, C.V.; Araujo,
L.G. *Collaborative Coastal Management in Brazil: Advancements,
Challenges, and Opportunities. In Viability and Sustainability of
Small-Scale Fisheries in Latin America and The Caribbean;*
Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 421–451. ISBN
9783319760780.
224. Şen, Z. *Innovative Trend Analysis Methodology. J. Hydrol. Eng.*
2012, 17, 1042–1046.
225. Shabangu, P.E. *Investigation of a Simplified Open Boundary
Condition for Coastal and Shelf Sea Hydrodynamic Models. Ph.D.
Thesis, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa, March*
2015.
226. Sharifahmadian, A.; Simons, R.R. *A 3D numerical model of
nearshore wave field behind submerged breakwaters. Coast.*
Eng. 2014, 83, 190–204.
227. Short, A.D.; Jackson, D.W.T. *Beach Morphodynamics.*
*In Treatise on Geomorphology; Shroder, J.F., Ed.; Academic Press:
San Diego, CA, USA, 2013; Volume 10, pp. 106–129.*
228. Silvester, R. *Natural headland control of beaches. Cont. Shelf*
Res. 1985, 4, 581–596.

229. Sinay, L.; Carter, R.W. *Climate Change Adaptation Options for Coastal Communities and Local Governments*. *Climate* 2020, 8, 7.
230. Sinopoli, S., Bonora, M. A., Capano, G., Carini, M., Pantusa, D., & Maiolo, M. (2020). *Optimization of submarine outfalls with a multiport diffuser design*. In *Numerical Computations: Theory and Algorithms: Third International Conference, NUMTA 2019, Crotona, Italy, June 15–21, 2019, Revised Selected Papers, Part I 3* (pp. 604-618). Springer International Publishing.
231. Sollitt, C.K.; Cross, R.H.; Engineer, C. *Wave Transmission Through Permeable Breakwaters*. *Coast. Eng.* 1972, 1827–1846.
232. Soomere, T., Behrens, A., Tuomi, L., and Nielsen, J. W.: *Wave conditions in the Baltic Proper and in the Gulf of Finland during windstorm Gudrun*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 37–46, doi:10.5194/nhess-8-37-2008, 2008.
233. Sorensen, J. C., & McCreary, S. T. (1990). *Institutional arrangements for managing coastal resources and environments* (No. 1). National Park Service, US Department of the Interior.
234. Sorensen, R.M.; Beil, N.J. *Perched beach profile response to wave action*. In *Proceedings of the 21st International Conference on Coastal Engineering, Malaga, Spain, 20–25 June 1988*; pp. 1482–1492.
235. Sorensen, R.M.; Beil, N.J. *Perched beach profile response to wave action*. In *Proceedings of the 21st International Conference on Coastal Engineering, Malaga, Spain, 20–25 June 1988*; pp. 1482–1492.
236. Spalding, M.D.; Ruffo, S.; Lacambra, C.; Meliane, I.; Hale, L.Z.; Shepard, C.C.; Beck, M.W. *The role of ecosystems in coastal*

- protection: Adapting to climate change and coastal hazards. Ocean Coast. Manag.* 2014, 90, 50–57.
- 237.** Speybroeck, J.; Bonte, D.; Courtens, W.; Gheschiere, T.; Grootaert, P.; Maelfait, J.P.; Mathys, M.; Provoost, S.; Sabbe, K.; Stienen, E.W.M.; et al. *Beach nourishment: An ecologically sound coastal defence alternative? A review. Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 2006, 16, 419–435.
- 238.** Stansby, P.K.: *A mixing-length model for shallow turbulent wakes. J Fluid Mech* 495:369-384, DOI 10.1017/S0022112003006384, 2003.
- 239.** Stopa, J.E., Cheung, K.F., and Chen, Y.L.: *Assessment of wave energy resources in Hawaii. Renew. Energy*, 36, 554–567, 2011.
- 240.** Sumer, B. M., Fredsøe, J., Lamberti, A., Zanuttigh, B., Dixen, M., Gislason, K., & Di Penta, A. F. (2005). *Local scour at roundhead and along the trunk of low crested structures. Coastal Engineering*, 52(10-11), 995-1025.
- 241.** Sutherland, J. *Guidelines on Beach Monitoring for Coastal Erosion in Concepts and Science for Coastal Erosion Management (Conscience) Project. Deliverable D15.* 2010.
- 242.** Switzer, A.D. and Jones, B.G.: *Large-scale wash over sedimentation in a freshwater la-agoon from the southeast Australian coast: sea-level change, tsunami, or exceptionally large storm? The Holocene* 18 (5), 787–803, 2008.
- 243.** Switzer, A.D.: *Twenty years of palaeotsunami studies on coastal sand sheets: a review. 2nd International Tsunami Field Symposium, IGCP Project 495. GICS Coast Research Publication. 6, pp. 163–165,* 2008.
- 244.** Syvitski, J.P.M.; Slingerland, R.L.; Burgess, P.; Murray, A.B.; Wiberg, P.; Tucker, G.; Voinov, A. *Morphodynamic models: An*

- overview. In *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2009*; Vionnet, C.A., Garcia, M.H., Latrubesse, E.M., Perillo, G.M.E., Eds.; Taylor & Francis: London, UK, 2010; pp. 3–20.
245. Te'eni, D. and Ginzberg, M. J. (1991). *Humancomputer decision systems: the multiple roles of DSS*. *European Journal of Operational Research* 50, 127–139.
246. Terranova O.G. & Gariano S.L. (2014) - *Rainstorms able to induce flash floods in a Mediterranean-climate region (Calabria, southern Italy)*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 14 (9): 2423-2434.
247. Tomasicchio, G.R., Lusito, L., D'Alessandro, F., Frega, F., Francone, A., and De Bartolo, S.: 2018. *A direct scaling analysis for the sea level rise*. *Stoch Environ Res Risk Assess* 32, 3397–3408 <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1568-3>, 2018.
248. Tommasini L., Carniello L., Ghinassi M., Roner M. & D'Alpaos A. (2019) - *Changes in the wind-wave field and related salt-marsh lateral erosion: inferences from the evolution of the Venice Lagoon in the last four centuries*. *Earth Surf. Process. Landforms*, 44: 1633-1646. <https://doi.org/10.1002/esp.4599>.
249. Trigo, R.M.; Osborn, T.J.; Corte-Real, J.M. *The North Atlantic Oscillation influence on Europe: Climate impacts and associated physical mechanisms*. *Clim. Res.* 2002, 20, 9–17.
250. U.S. Army Corps of Engineers (USACE) Coastal and Hydraulics Laboratory (CHL) - Centro Studi di Ingegneria Ambientale (CSdIA) (2000) - *Analisi Regionale del Litorale della Provincia di Cosenza*. Ed. Provincia di Cosenza
251. Uittenbogaard, R., van Vossen, B.: *Subgrid-scale model for quasi-2D turbulence in shallow water*. In: *Shallow Flows*, Taylor & Francis, pp 575-582, DOI 10.1201/9780203027325.ch72, 2004.

252. Ulbrich, U., Fink, A., Klawwa, M., and Pinto, J. G.: Three extreme storms over Europe in December 1999, *Weather*, 56, 70–80, 2, 2001.
253. Urraca, R.; Huld, T.; Gracia-Amillo, A.; Martinez-de-pison, F.K.; Sanz-Garcia, A. Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data. *Sol. Energy* 2018, 164, 339–354.
254. Van Gelder, P., de Ronde, J., Neykov, N., and Neytchev, P.: Regional frequency analysis of extreme wave heights: Trading space for time, in *Proceedings of the 27th ICCE Coastal Engineering, Coastal Engineering 2000, Sydney, Australia, vol. 2*, pp. 1099–1112, 2000
255. van Rijn, L.C. *Principles of Sedimentation and Erosion Engineering in Rivers, Estuaries and Coastal Seas Including Mathematical Modelling Package*; Aqua Publications: Amsterdam, The Netherlands, 2005; ISBN 9080035661.
256. Vecchi, G.A.; Wittemberg, A.T. El Niño and our future climate: Where do we stand? *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.* 2010, 1, 260–270.
257. Viero, D.P., D’Alpaos, L., Carniello, and Defina, A.: Mathematical modeling of flooding due to river bank failure. *Adv. Water Resour.*, 59, 82–94.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.05.011>, 2013
258. Viero, D.P.; D’Alpaos, A.; Carniello, L.; Defina, A. Mathematical modeling of flooding due to river bank failure. *Adv. Water Resour.* 2013, 59, 82–94. [Google Scholar] [CrossRef]
259. Viero, D.P.; Defina, A. Multiple states in the flow through a sluice gate. *J. Hydraul. Res.* 2019, 57, 39–50.

260. Vitale, D.; Rana, G.; Pietro, S. Trends Analysis of Daily Data from a Site in the Capitanata Plain (Southern Italy). *Ital. J. Agron.* 2010, 5, 133–144.
261. WAMDI Group. The WAM model—A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.* 1988, 18, 1775–1810.
262. Warnken, J.; Mosadeghi, R. Challenges of implementing integrated coastal zone management into local planning policies, a case study of Queensland, Australia. *Mar. Policy* 2018, 91, 75–84.
263. Weisse, R. and von Storch, H.: *Marine Climate and Climate Change, in: Storms, Wind Waves and Storm Surges*, Springer, Praxis Publishing, Chichester, UK, 2010
264. Wiegel R.L. (1964) - *Oceanographical Engineering*. Mineóla.
265. Williams A., Buitrago N.A., Pranzini E. & Anfuso G. (2018) - *The management of coastal erosion. Ocean & Coastal Management*, Volume 156, Pages 4-20, doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.03.022.
266. Woth K., Weisse R. & Von Storch H. (2006) - *Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models.* *Ocean Dynam.*, 56: 3–15. Doi: 10.1007/s10236-005-0024-3.
267. Yang, Z.; García-Medina, G.; Wu, W.C.; Wang, T.; Ruby Leung, L.; Castrucci, L.; Mauger, G. Modeling analysis of the swell and wind-sea climate in the Salish Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2019, 224, 289–300.
268. Yasso, W.E. *Plan Geometry of Headland-Bay Beaches*. *J. Geol.* 1965, 73, 702–714.
269. Young, I.R. *Wind Generated Ocean Waves*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1999; Volume 2, ISBN 9780080433172.

270. Zarzuelo C., Díez-Minguito M., D'Alpaos A., Carniello L., Rosal-Salido J. & Ortega-Sánchez M. (2016) - *Morphodynamic response to human activities in the bay of Cádiz (2012-2015)*. *Coastal Engineering Proceedings*. ICCE,. 1–11. <https://doi.org/10.9753/icce.v35.sediment.16>. 2018.
271. Zarzuelo C., López-Ruiz, A., D'Alpaos, A., Carniello, L., and Ortega-Sánchez, M.: *Assessing the morphodynamic response of human-altered tidal embayments*, *Geomorphology*, 320, 127– 141, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.08.014>, 2018.
272. Zhang K., Douglas B.C., Stephen P. & Leatherman S.P. (2004) - *Global Warming and Coastal Erosion*. *Climatic Change*, 64 (1): 41-58. Doi: 10.1023/B:CLIM.0000024690.32682.48