

Napoli, 3 luglio 2023  
Sala Polifunzionale del DaDoM, Stazione Zoologica Anton Dohrn, Napoli  
Villa Comunale, 80121 Napoli NA  
“Sedimenti marino-costieri: gestione e valorizzazione della risorsa”

## **Monitoraggio di aree costiere e possibili interventi di tipo ingegneristico per il recupero di coste soggette a erosione**

Silvano Focardi<sup>1</sup> e Milva Pepi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell’Ambiente, Università di Siena, Via Mattioli, 4, 53100 Siena, Italy; [focardisilvano@gmail.com](mailto:focardisilvano@gmail.com)

<sup>2</sup>Stazione Zoologica Anton Dohrn, Fano Marine Centre, Viale Adriatico, 1-N, 61032 Fano, Italy; [milva.pepi@szn.it](mailto:milva.pepi@szn.it)

### **Riassunto**

Il monitoraggio delle aree costiere riveste una fondamentale importanza per l’ambiente marino. L’innalzamento del livello del mare, l’erosione costiera, le modifiche del litorale, alluvioni e pericolose fioriture algali, sono esempi di rischi a livello delle aree costiere risultanti dal cambiamento climatico. Inoltre, ulteriori esempi di rischi e criticità a livello costiero possono essere rappresentati da sversamenti di idrocarburi, dalla contaminazione di composti chimici impiegati in agricoltura, dalla presenza di materia organica, da residui di farmaci e da attività di dragaggio. Il monitoraggio delle aree costiere richiede quindi attenzione, cura e regolarità di esecuzione. Interventi di monitoraggio tramite campionamenti e attività di laboratorio, sonde parametriche fisse, rilevatori del livello delle acque, sono esempi di approcci importanti e necessari. A questo si affiancano tecnologie recenti e basate sul controllo da remoto basata su satelliti o sull’impiego di aeromobili a pilotaggio remoto che permettono di rilevare i parametri costieri su larga scala, in tempi brevi, estendendosi anche ad aree di difficile accesso. Inoltre, l’imponente raccolta di dati tramite tecniche da remoto permette l’applicazione di modelli in grado di fornire informazioni sugli sviluppi futuri. Queste ultime rappresentano uno strumento importante che politici locali possono sfruttare per prendere decisioni e programmare eventuali interventi. Le coste costituiscono quindi un contesto importante e delicato. La loro protezione da eventi dovuti al cambiamento climatico, come l’erosione costiera, richiedono interventi mirati di tipo ingegneristico. Interventi di ingegneria pesante e leggera possono contrastare gli effetti della erosione costiera, dell’azione delle onde, alterazioni del litorale e inondazioni, ristabilendo quindi le coste dal punto di vista strutturale e riabilitandone sia la funzionalità, sia le attività correlate. Possibili interventi di tipo ingegneristico sono in grado di mitigare i danni a livello costiero, in accordo con le regole della sostenibilità.

### **Introduzione**

Le aree costiere hanno permesso lo sviluppo di varie attività come la pesca, l’acquacoltura, il turismo e inoltre presentano un’elevata produttività biologica ed ecologica. Negli ultimi anni, le coste hanno mostrato importanti cambiamenti a causa di un aumento della popolazione e dell’intensificarsi dei processi di urbanizzazione e di industrializzazione [Pramanik et al 2016]. Le zone costiere sono esposte all’azione continua di fattori sia naturali, sia antropici. Tra i fattori naturali sono da segnalare l’altezza e la direzione delle onde, i venti, le maree, il trasporto dei sedimenti, l’incremento dei sedimenti per l’azione dei fiumi, la subsidenza dei suoli, il relativo innalzamento del livello del mare, le piogge, la frequenza e l’intensità di eventi climatici estremi. Inclusi tra i fattori di origine antropica sono invece incluse alcune costruzioni

marittime e sistemi di difesa costiera come barriere marine. Tali strutture, infatti, interferiscono con le dinamiche dei sedimenti. Inoltre, la costruzione di abitazioni, insediamenti industriali, infrastrutture a carattere ricreativo, oltre a interventi per la gestione del bacino dei fiumi e per la correzione di corsi d'acqua per andare a costituire approvvigionamenti per l'acqua potabile, o per irrigazione e per uso industriale, possono dar luogo ad alterazioni della vegetazione e dei boschi di drenaggio [Pramanik et al 2016; De Serio et al 2019].

Nel mondo si stimano circa 504,000 km di costa che ospitano una percentuale ampia e crescente della popolazione mondiale, con oltre il 10% della popolazione mondiale che vive lungo le zone costiere a meno di 10 m sul livello del mare, mentre circa il 40% della popolazione mondiale vive entro 100 km dalla costa [Toure et al 2019].

Le aree costiere sono esposte all'azione continua di vari fattori, sia naturali, sia di origine antropica. Le coste sono sottoposte a una intensa pressione che deriva dalla crescita urbana, dall'industria, dall'agricoltura, dall'acquacoltura e da turismo. Altri fattori, anch'essi sia di origine naturale, sia antropica, come un ridotto input dei sedimenti fluviali, variazioni batimetriche offshore, profili alterati di onde e venti, o una combinazione di fattori, possono avere un impatto importante sulle coste, come l'erosione costiera [Valentine and Mariotti 2019].

Tra i fattori più importanti, sono da annoverare le costruzioni marittime e le barriere di difesa costiera, come i porti che interferiscono con le dinamiche dei sedimenti; costruzioni di abitazioni; infrastrutture industriali e relative al turismo; interventi per la gestione di bacini di fiumi e dei corsi d'acqua per il rifornimento di risorse idriche per uso domestico; l'irrigazione in agricoltura e l'utilizzo di acqua nelle industrie; boschi di drenaggio. Alcuni dei fattori naturali più rappresentativi che alterano le coste sono costituiti dall'altezza delle onde, il vento, le maree, il trasporto dei sedimenti, l'aggiunta di sedimenti da parte dei fiumi al mare, la subsidenza, l'innalzamento del livello del mare, le piogge, la frequenza e l'intensità di eventi meteorologici estremi, incluse le tempeste [Cantasano et al 2017].

### **Monitoraggio delle zone costiere**

Il monitoraggio delle zone costiere è caratterizzato da dinamiche complesse ed è di fondamentale importanza. I metodi di misurazione tradizionali sono comunemente applicati, ma richiedono molto tempo e potrebbero non fornire i dettagli locali necessari e/o coprire completamente le informazioni nella scala temporale [Minervino Amodio et al 2022] (Figura 1).

I campionamenti di acqua e sedimento e le successive analisi di laboratorio rappresentano importanti tipi di approccio per il rilevamento di contaminanti ambientali, sia chimici, sia microbiologici.

Inoltre, il rilevamento di parametri *in situ*, tramite sonde parametriche o misuratori del livello dei mari, è in grado di fornire informazioni fondamentali per la comprensione del sistema costiero.

Un aspetto importante è dato dal bilancio dei sedimenti (*sediment budget*) in grado di fornire un modello concettuale e quantitativo delle grandezze e dei percorsi di trasporto dei sedimenti per un dato periodo di tempo. I bilanci dei sedimenti costituiscono un quadro per la comprensione di un complesso sistema costiero, sia nella sua condizione naturale che artificiale. Un bilancio dei sedimenti comprende la valutazione in termini di guadagni e perdite di sedimenti, così da poter comprendere la fonte dei sedimenti, all'interno di un volume di controllo specificato e in un periodo di tempo definito. Il bilancio dei sedimenti è un bilancio dei volumi, o dei tassi di variazione del volume, per i sedimenti che entrano e per quelli che lasciano una regione di costa selezionata e permettono di valutare la conseguente erosione o l'accrescimento nell'area costiera considerata (Rosati 2005). L'andamento della circolazione dei sedimenti e il bilancio dei sedimenti su scala regionale si ricavano dall'equazione di continuità del volume dei sedimenti, che può essere calcolata sia in modo analitico, tramite equazioni derivate empiricamente propagando le onde in un'area con

caratteristiche morfologiche e sedimentologiche costiere ben note, o misurando i volumi dei sedimenti erosi e accumulati [Pranzini et al 2020].

Di fondamentale importanza è adottare tecniche di telerilevamento in grado di utilizzare immagini satellitari per misurare la morfologia delle coste. Lo stato dell'erosione costiera può essere valutato utilizzando sistemi integrati per fornire un modello completo per il rilevamento e il monitoraggio dell'erosione costiera e per promuovere un percorso chiaro che servirà in contesti decisionali per la gestione costiera [Chapapría et al 2022].

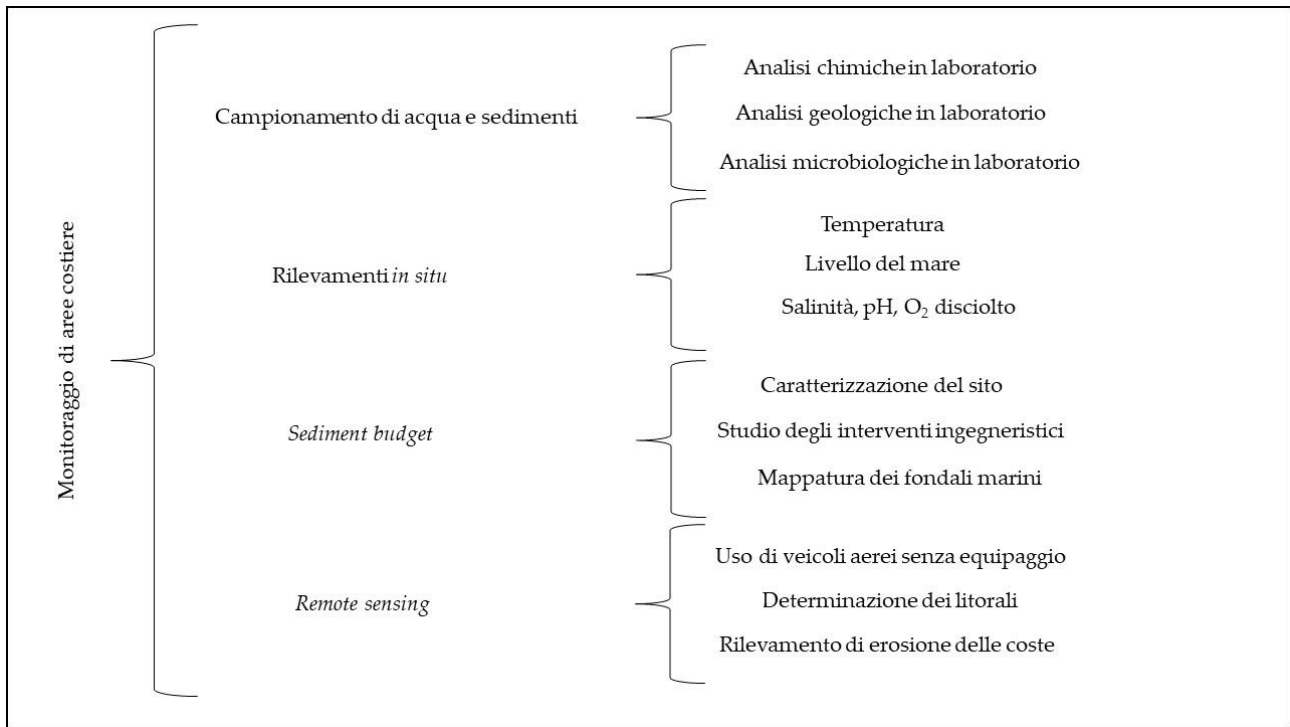
L'utilizzo di veicoli aerei senza equipaggio (UAV) è in continua espansione per il telerilevamento [Yao et al 2019]. Il progresso e la facile accessibilità della tecnologia dei veicoli aerei senza equipaggio ha consentito lo sviluppo di una tecnica alternativa di monitoraggio costiero che cattura in modo efficiente i requisiti spaziali e temporali in un'ampia gamma di applicazioni ambientali. Questo tipo di approccio consente di valutare la distribuzione spazio-temporale dei cambiamenti costieri; valutare i cambiamenti della costa a lungo e a breve termine; rilevare i più recenti cambiamenti della costa e la morfo-topografia spiaggia-dune; valutare la possibile influenza di tali cambiamenti sulla vulnerabilità delle aree all'erosione costiera e alle inondazioni [Yao et al 2019].

Il profilo della costa può cambiare e non esiste un indicatore utilizzabile per tutti i tipi di costa. Pertanto, gli indicatori funzionali dipendono dal profilo di costa e dagli obiettivi di monitoraggio. Gli indicatori costieri devono rappresentare schematicamente e correttamente lo stato complessivo della costa dal punto di vista della sua evoluzione sedimentaria. Questi indicatori dovrebbero soddisfare i requisiti di essere in grado di evidenziare i cambiamenti nel livello costiero, ma non dovrebbero essere sensibili nella misura in cui sono influenzati dai cambiamenti stessi [Toure et al 2019].

Il monitoraggio costiero con velivoli senza pilota consente di ottenere dati e metodologie che integrano algoritmi di visione artificiale per il 3D e tecniche di elaborazione delle immagini per l'analisi, combinate con informazioni marittime [Chapapría et al 2022].

I veicoli aerei senza equipaggio si sono rivelati strumenti efficaci nel monitoraggio delle fioriture algali. La gamma delle onde rilevate è compresa tra 500 e 1400 nm (gamma del visibile e del vicino infrarosso). L'uso di un velivolo senza equipaggio per mappare quantitativamente la distribuzione di Chl-*a* nelle acque superficiali nelle acque costiere da bassa quota si è rivelato un metodo economico, robusto e in grado di mappare le variazioni spaziali e temporali della concentrazione di clorofilla-*a* durante una fioritura algale [Qi et al 2022].

L'approccio per il monitoraggio delle coste, con operazioni di campionamento per analisi di laboratorio; il rilevamento di parametri *in situ*; valutazioni tramite equazioni da cui ricavare un bilancio dei sedimenti (*sediment budget*) e delle modifiche apportate alle coste; l'impiego di approcci di *remote sensing* come l'utilizzo di veicoli aerei senza equipaggio (*unmanned aerial vehicles - UAV*) è riassunto nella Figura 1.



**Figura 1** – Approcci di monitoraggio multidisciplinare delle coste.

### Alterazioni di ambienti costieri

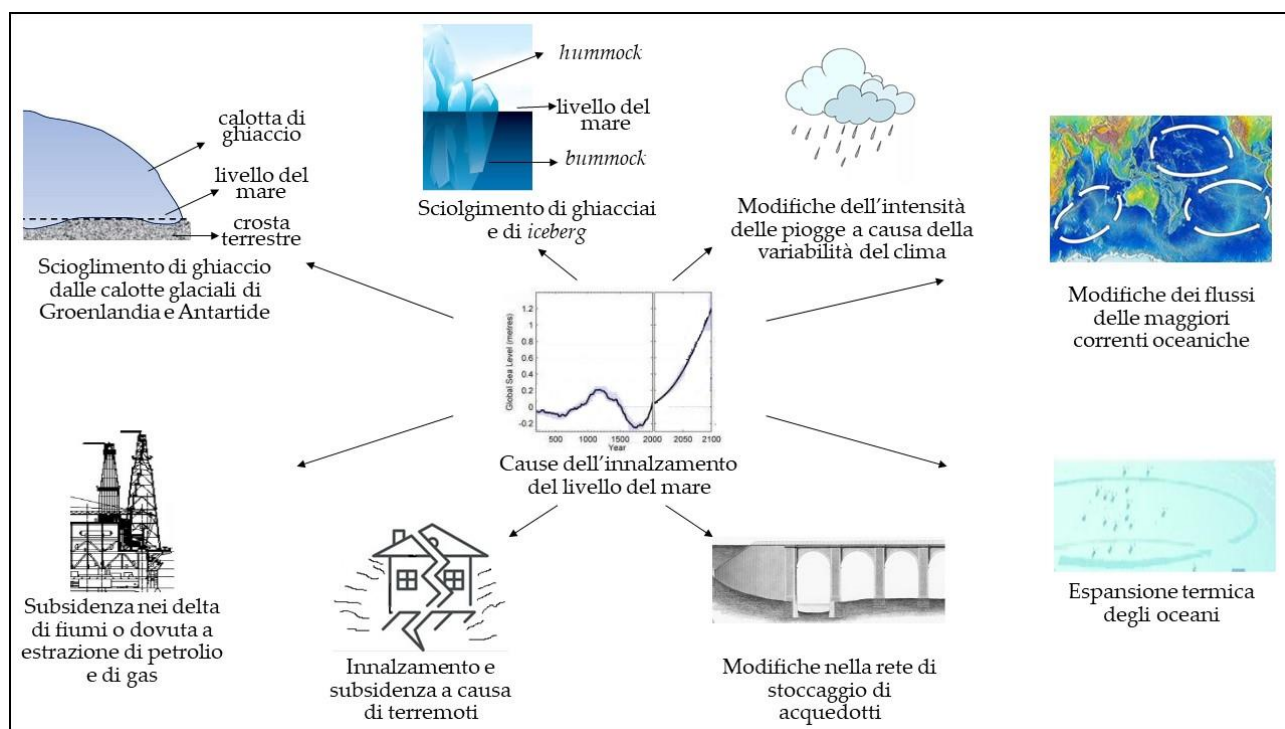
La vulnerabilità delle coste è attualmente in rapido aumento a causa del cambiamento climatico. Essa si manifesta attraverso un aumento di inondazioni, cambiamenti nel profilo delle coste, erosione costiera, aumento e cambiamenti nelle morfologie costiere, cambiamenti nelle velocità di trasporto a livello costiero ed erosione costiera. I porti possono dar luogo a erosione costiera alterando il profilo delle onde. I cambiamenti nei profili meteorologici possono inoltre provocare una intensificazione della frequenza di eventi estremi [Chaparría et al 2022].

La maggior parte degli ambienti costieri in tutto il mondo risente dell'azione dei cambiamenti climatici. Le conseguenze più importanti dei cambiamenti climatici sono rappresentati dall'aumento globale del livello del mare e da un aumento di frequenza e di intensità dei temporali. A questo proposito, vale la pena mettere in evidenza che le inondazioni marine potrebbero amplificare l'erosione delle spiagge e l'intrusione salina, aumentando così la suscettibilità delle popolazioni e degli ecosistemi costieri. Inoltre, questi effetti potrebbero essere ancora più pericolosi se combinati con un'alta concentrazione di persone e di attività socioeconomiche [Armenio and Mossa 2020].

Gli impatti del cambiamento climatico si possono manifestare a livello delle aree costiere con l'innescarsi di processi di erosione, inondazioni e l'intrusione di acqua marina, con gravi conseguenze per i beni naturali e per quelli socio-economici.

L'innalzamento del livello medio globale del mare è una delle conseguenze più evidenti del riscaldamento globale in corso. Infatti, il livello medio globale del mare potrebbe salire fino a 1,10 m entro la fine del 21° secolo [IPCC 2021]. Molte coste sabbiose sono già soggette a erosione e quasi la metà delle spiagge sabbiose del mondo potrebbe essere considerata prossima all'estinzione entro la fine del secolo a causa dell'azione delle emissioni di gas serra. In assenza di strategie di protezione o di adattamento delle coste e considerando le peggiori condizioni climatiche, entro il 2100 ci sarà un aumento del 48% della superficie terrestre mondiale a rischio di inondazioni, minacciando il 52% della popolazione e il 46% delle risorse globali [Sarkar et al 2022]. Le mareggiate costituiscono un aspetto significativo del clima costiero estremo che possono contribuire all'innalzamento del livello delle acque e all'esacerbazione dell'erosione costiera episodica. A

causa di questi fenomeni, l'innalzamento estremo del livello del mare potrebbe portare a una frequenza senza precedenti di eventi estremi di erosione costiera in molte parti del mondo [Vousdoukas et al 2018]. Grandi variazioni nelle portate fluviali e nello scarico solido associato dovute all'aumento dell'evapotraspirazione, al cambiamento delle precipitazioni e delle nevicate sono prodotte dal cambiamento climatico [Toimil et al 2020]. Le comunità costiere affrontano gravi sfide socio-economiche poste dagli impatti disastrosi di pericoli naturali come gli uragani. Tali sfide sono esacerbate da un aumento della popolazione nel tempo, unito all'invecchiamento delle infrastrutture esistenti, all'aumento del valore della proprietà e ai previsti cambiamenti nella frequenza e nell'intensità dei pericoli naturali dovuti al cambiamento climatico [González-Dueñas and Padgett 2021]. Alcuni aspetti legati ai cambiamenti climatici sono quindi responsabili dell'innalzamento del livello del mare, come riportato in Figura 2.



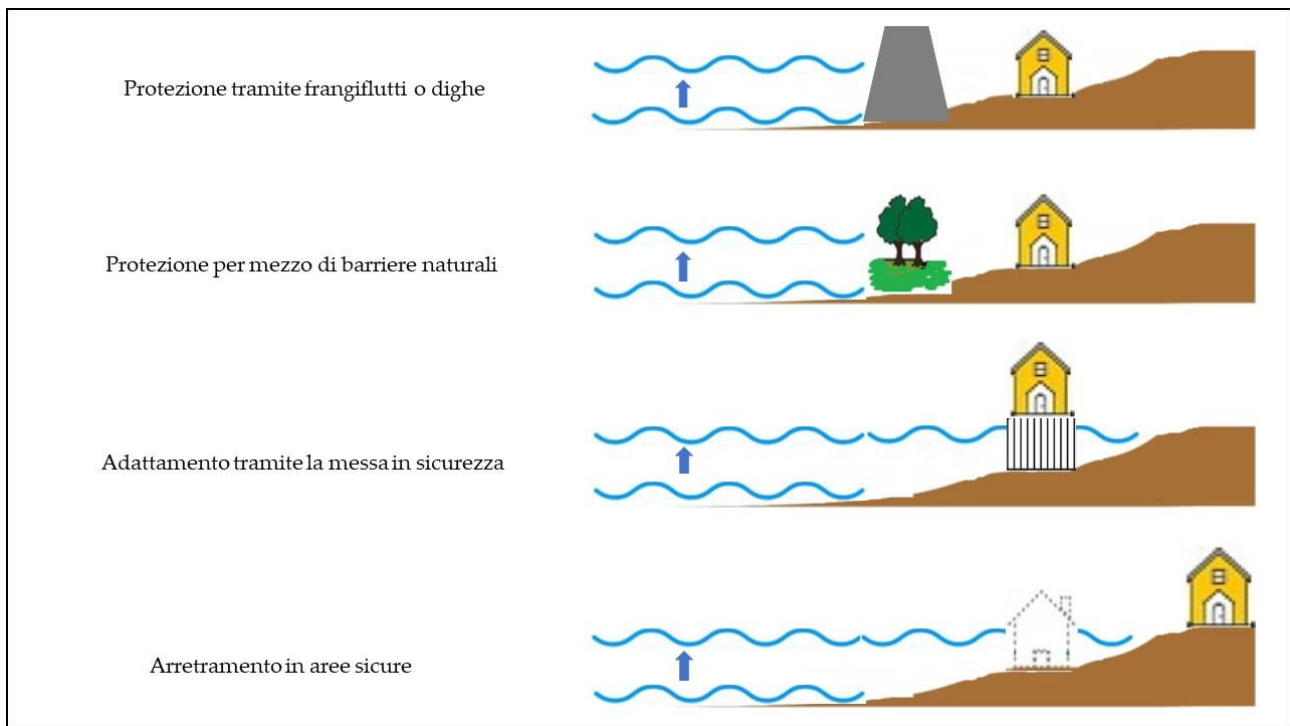
**Figura 2** – Cause dell'innalzamento del livello del mare.

### Approcci di tipo ingegneristico per la protezione delle coste

La minaccia del futuro innalzamento del livello del mare per le città costiere e le aree basse di tutto il mondo, combinata con le tempeste, l'erosione e le inondazioni e il rapido degrado dei sistemi costieri naturali, sarà una delle principali sfide sociali e infrastrutturali di questo secolo [Griggs and Roguero 2021].

I potenziali impatti negativi di innalzamento del livello del mare sono rappresentati da inondazioni delle coste, erosione costiera accelerata, intrusione di acqua salata e subsidenza del terreno. A livello globale, l'innalzamento del livello del mare è anche ritenuto responsabile dei problemi di erosione costiera a lungo termine [Rashidi et al 2021].

Il primo studio dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Coastal Management Subgroup and Response Strategies Working Group ha proposto tre approcci per l'adattamento all'innalzamento del livello del mare: protezione, sia di tipo di ingegneria pesante con dighe o frangiflutti, sia di tipo naturale con vegetazione; adattamento con la messa in protezione degli edifici; arretramento di edifici in zone sicure [Rashidi et al 2021] (Figura 3).



**Figura 3** - Approcci di adattamento all'innalzamento del livello del mare.

La gestione delle aree costiere è diventata fondamentale per proteggere la costa, contenere e ridurre i processi di degrado in corso ed evitare l'insorgere di nuove crisi. Questi approcci sono necessari per realizzare efficacemente una gestione integrata delle zone costiere [Armenio et al 2020]. L'ingegneria costiera svolge un ruolo chiave nella valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici lungo le coste e nell'offrire soluzioni di adattamento per la resilienza dei sistemi costieri. Nel frattempo, le popolazioni nelle aree costiere continuano a crescere, evidenziando la necessità di proteggere e preservare i sistemi costieri di fronte all'intensificarsi del cambiamento climatico [Armenio et al 2020].

L'ingegneria pesante, chiamata anche "infrastruttura grigia", è una tecnica di gestione costiera utilizzata per proteggere le coste dall'assorbimento dell'energia delle onde, riuscendo così a prevenire l'erosione e le inondazioni [Singhvi et al 2022]. L'ingegneria pesante è efficace nella stabilizzazione del litorale, ma può causare ulteriori fenomeni di erosione e destabilizzazione la costa [Gracia et al 2018].

L'erosione delle spiagge sabbiose legata all'innalzamento del livello del mare è destinata ad aumentare in futuro. L'erosione della costa rocciosa deriva dalla recessione della scogliera, che è una conseguenza del crollo della scogliera. Questi crolli causano importanti cambiamenti della costa rispetto al graduale cambiamento dovuto all'erosione della spiaggia sabbiosa, sebbene la frequenza del crollo della scogliera rocciosa sia relativamente bassa.

Strutture artificiali, come barre di metallo inserite nelle scogliere per il rinforzo, possono essere aggiunte per proteggere i litorali dall'erosione in processi di ingegneria pesante chiamati fissaggio delle scogliere [Kogure 2022] (Tab. 1). Lo sbarramento costiero consiste in strutture simili a dighe parzialmente sommerse che controllano il flusso di marea. Lo sbarramento costiero ha un impatto importante sulle mareggiate consistenti in cambiamenti nel livello dell'acqua guidati dalla forzatura atmosferica. L'energia cinetica presente nelle correnti marine e di marea può essere convertita in elettricità utilizzando una tecnologia basata sull'impiego di turbine [Ramli et al 2013] (Tab. 1). I gabbioni sono costituiti da fasci di rete metallica o rocce poste su scogliere nude, che hanno lo scopo di ridurre l'impatto delle onde. I gabbioni sono stati a lungo utilizzati come dispositivi antierosione su pile e spalle di ponti [Ramli et al 2013] (Tab. 1). I frangiflutti sono strutture che bloccano parzialmente o completamente la deriva del litorale e sono costituiti da barriere

di legno simili a staccionate costruite ad angolo retto sulla spiaggia. I frangiflutti limitano la quantità di sedimenti depositati nelle bocche di marea e nei canali di navigazione [Kristensen et al 2016] (Tab. 1). I rivestimenti sono costituiti da strutture inclinate in cemento, legno o roccia lungo una scogliera, che prevengono l'erosione della scogliera assorbendo l'energia dell'onda. Richiedono lavori di manutenzione importanti [Abd-Elmonem et al 2022] (Tab. 1). Le armature rocciose sono costituite da grandi massi o rocce ammassate su una spiaggia di fronte a una scogliera o a una diga. Queste strutture assorbono l'energia delle onde e aiutano a proteggere le coste [Eldrup and Andersen 2019] (Tab. 1). Le dighe marittime sono costruite in cemento, acciaio o pietra situate lungo il litorale della spiaggia. Queste strutture di ingegneria pesante proteggono le scogliere dall'erosione e dalle inondazioni [Griggs and Roguero 2021] (Tab. 1). Queste comuni strutture di ingegneria pesante per la protezione delle coste possono presentare alcuni svantaggi in quanto possono essere costose, possono rappresentare soluzioni a breve termine e possono avere un impatto sull'ambiente e richiedono un monitoraggio continuo [Focardi and Pepi 2023].

**Tabella 1:** Approcci di ingegneria pesante.

<b>Tipo</b>	<b>Definizione</b>	<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>
fissaggio della scogliera	barre di metallo vengono inserite nelle scogliere per il loro rinforzo	miglioramento della solidità delle scogliere	questo metodo può causare dispersione di metalli
sbarramento costiero	strutture simili a dighe parzialmente sommerse per il controllo del flusso delle maree	livelli d'acqua più consistenti che possono originare energia idroelettrica	ha un forte impatto sull'ambiente ed è costoso
gabbioni	rocce impacchettate in rete metallica situate in strapiombi spogli	riduzione dell'impatto delle onde	una struttura ingegneristica poco efficace e non gradevole alla vista
frangiflutti	barriere costruite ad angolo retto sulla spiaggia	prevenzione della deriva lungo la costa, delle inondazioni e dell'erosione	può essere causata l'erosione più in basso lungo la costa, poco gradevole e costosa
rivestimento	strutture inclinate in cemento, legno o rocce lungo una scogliera	prevenzione dell'erosione delle scogliere tramite l'assorbimento dell'energia delle onde	costoso e può causare forti mulinelli delle onde
armatura delle rocce	grandi massi o rocce ammassate sulla spiaggia di fronte a una scogliera o a una diga	assorbimento dell'energia delle onde	costoso per miglioramenti e manutenzione
dighe marittime	grandi dighe costruite in cemento, acciaio o pietra lungo le coste della spiaggia	protezione delle scogliere dall'erosione e contrasto delle inondazioni	si possono originare onde che erodono la diga, costoso per miglioramenti e manutenzione

L'ingegneria leggera prevede interventi come il ripristino delle dune e il ripascimento sabbioso, compreso il ripascimento delle spiagge, I quali consentono alla costa di rispondere dinamicamente ai cambiamenti. Tale

approccio viene definito “costruire con la Natura”, una strategia che fornisce una risposta efficace per proteggere le spiagge e le aree costiere [Bongarts Lebbe et al 2021]. I processi di ecoingegneria forniscono importanti spunti per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici. Gli habitat costieri con vegetazione possono dissipare l'energia delle onde operando una separazione del loro flusso. Anche le fanerogame marine e altri habitat costieri con vegetazione forniscono protezione dissipando l'energia delle onde, a causa dell'attrito dovuto alla loro presenza, che aumenta la rugosità del fondo e riduce la velocità delle onde [Bongarts Lebbe et al 2021]. Le dune costiere rappresentano elementi importanti nella risposta costiera alle onde e agli impatti delle mareggiate sulle coste. La copertura vegetale compatta i sedimenti, promuovendo l'accumulo di sedimenti nuovi e quindi aumenta il volume della duna e l'innalzamento della cresta della duna. Questo approccio offre vantaggi stabilizzando le dune, riducendo così al minimo la deriva della sabbia e l'erosione [Jackson et al 2019] (Tab. 2). Il ripascimento delle spiagge consente di aumentare la distanza che un'onda deve percorrere, rallentandola e prevenendo l'erosione. Le pratiche di ripascimento si sono evolute per mantenere per tempi lunghi la sabbia sulla spiaggia e favorire la sicurezza e le dinamiche delle acque sotterranee e degli impatti sull'ecosistema [de Schipper et al 2021] (Tab. 2). La stabilizzazione della spiaggia consiste nel piantare alberi morti nella sabbia per stabilizzare la spiaggia. Questo approccio rallenta le onde e previene l'erosione. I lavori di stabilizzazione del litorale possono quindi non solo aiutare a preservare le fragili condizioni ecologiche, ma anche portare a una crescita sostenibile dell'economia locale [Escudero et al 2020] (Tab. 2). La conservazione e il miglioramento della barriera corallina prevede sia la protezione delle barriere coralline esistenti, sia la creazione di barriere artificiali mediante l'immissione di materiali ecocompatibili sul fondo marino. Le barriere coralline riducono l'altezza dell'energia delle onde e proteggono dall'erosione costiera. Il ripristino della barriera corallina può essere uno strumento utile per supportare la resilienza costiera [Bongarts Lebbe et al 2021] (Tab. 2). Le dune fungono da barriera e assorbono l'energia delle onde riducendo l'erosione costiera e proteggendo dalle inondazioni, pertanto la procedura di rigenerazione delle dune mira alla formazione di nuove dune di sabbia o al ripristino delle dune esistenti [Lawlor and Jackson 2022] (Tab. 2). Nella procedura di arretramento gestito, alcune aree costiere, scelte sulla base del loro basso valore, possono essere sottoposte ad erosione e allagamento guidato. Le coste naturalmente erose favoriscono così lo sviluppo di spiagge e barene. Si tratta di un processo a basso costo [Lawlor and Jackson 2022] (Tab. 2). La conservazione e la piantumazione delle mangrovie sono approcci di ingegneria leggera che richiedono la piantumazione di alberi di mangrovie lungo la costa. Le radici degli alberi di mangrovia mantengono il terreno prevenendo l'erosione e aiutando a dissipare l'energia delle onde. Le zone umide costiere come le mangrovie e le paludi salmastre hanno guadagnato interesse come ecosistemi importanti per ridurre la vulnerabilità delle comunità costiere. Il ripristino delle mangrovie è considerato una strategia ampiamente applicabile per migliorare la sicurezza costiera [Ellison et al 2020] (Tab. 2).



<b>Tabella 2: Approcci di ingegneria leggera.</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Definizione</b>	<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>
rimboschimento delle dune costiere	stabilizzazione delle dune mediante piantumazione di alberi	riduzione al minimo della deriva della sabbia e dell'erosione	la piantumazione di alberi alloctoni può causare impatti sui nutrienti del suolo
ripascimento della spiaggia	la spiaggia è allargata utilizzando sabbia e ghiaia	la velocità delle onde viene rallentata e si previene l'erosione	è richiesta un'elevata manutenzione e può essere costoso
stabilizzazione della spiaggia	applicare alberi morti nella sabbia per stabilizzare la spiaggia	spiagge allargate, rallentamento delle onde e prevenzione dell'erosione	l'acquisto degli alberi può essere costoso e richiede manutenzione
conservazione e miglioramento della barriera corallina	proteggere le barriere coralline esistenti dai danni e creare barriere artificiali	riduzione dell'altezza e dell'energia delle onde e protezione dall'erosione costiera	le barriere artificiali possono causare inquinamento
rigenerazione delle dune	creazione di nuove dune di sabbia o ripristino di dune esistenti	le dune fungono da barriere e assorbono l'energia delle onde riducendo l'erosione	le dune costituiscono una barriera per l'accesso alla spiaggia e provocano la perdita di spazio
arretramento gestito	alcune zone delle coste vengono facilitate ad allargarsi naturalmente	materiale naturale eroso sviluppa spiagge a basso costo	richiede di risarcire le persone che perdono edifici e terreni agricoli
conservazione e impianto di mangrovie	piantare alberi di mangrovie lungo la riva	le mangrovie prevengono l'erosione con le radici e aiutano a dissipare l'energia delle onde	le mangrovie non autoctone possono diventare invasive

## **Conclusioni**

Il monitoraggio delle coste è strategico e si esegue adottando diversi tipi di approccio, dalle analisi di laboratorio alle indagini di telerilevamento. Affiancate alle tecnologie consolidate per il monitoraggio delle coste, lo sviluppo di tecnologie innovative come l'uso di velivoli senza pilota, hanno consentito importanti miglioramenti nelle procedure di monitoraggio. In particolare, l'erosione costiera è stata rilevata adottando questi strumenti di monitoraggio combinati con un'elaborazione efficiente dei dati ottenuti applicando modelli matematici. L'ingegneria pesante, o "infrastruttura grigia", e l'ingegneria leggera, denominata anche "soluzioni basate sulla natura", rappresentano importanti interventi che possono essere utilizzati per far fronte ai problemi che affliggono le coste, andando a migliorare le condizioni ambientali e quelle socio-economiche. Intuizioni e ricerche future dovranno includere il miglioramento degli approcci ingegneristici a livello costiero, unito a una importante attività di monitoraggio, prima e dopo ciascun processo di intervento ingegneristico, con lo scopo di valutare attentamente le condizioni ambientali e gli effetti degli interventi.

## **Bibliografia**

Abd-Elmonem IM, Abedio TI, Kheireldin KA, Soliman MR (2022) Assessment of Coastal Revetment: Case study of Rosetta Revetment. Ain Shams Engineering Journal 13(3): 101623.

Armenio E, Mossa M (2020) On the Need for an Integrated Large-Scale Methodology of Coastal Management: A Methodological Proposal. *Journal of Marine Science and Engineering* 8: 385. doi:10.3390/jmse8060385

Bongarts Lebbe T, Rey-Valette H, Chaumillon É, Camus G, Almar R, Cazenave A, Claudet J, Rocle N, Meur-Férec C, Viard F, Mercier D, Dupuy C, Ménard F, Rossel BA, Mullineaux L, Sicre M-A, Zivian A, Gaill F and Euzen A (2021) Designing Coastal Adaptation Strategies to Tackle Sea Level Rise. *Frontiers in Marine Sciences* 8: 740602. doi: 10.3389/fmars.2021.740602.

Cantasano N, Pellicone G, Ietto F (2017) Integrated coastal zone management in Italy: A gap between science and policy. *Journal of Coastal Conservation* 21: 317–325.

Chapapriá VE, Peris JS, González-Escrivá JA (2022) Coastal Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for the Management of the Spanish Mediterranean Coast: The Case of Almenara-Sagunto. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19: 5457. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095457>

de Schipper MA, Ludka BC, Raubenheimer B, Luijendijk AP, Schlacher TA (2021) Beach nourishment has complex implications for the future of sandy shores. *Nature Reviews Earth and Environment* 2: 71.

De Serio F, Armenio E, Mossa M, Petrillo AF (2018) How to Define Priorities in Coastal Vulnerability Assessment. *Geosciences* 8: 415. doi:10.3390/geosciences8110415

Eldrup MR, Andersen TL (2019) Extension of shallow water rock armour stability formulae to nonlinear waves. *Coastal Engineering* 153: 103536.

Ellison AM, Felson AJ, Friess DA (2020) Mangrove Rehabilitation and Restoration as Experimental Adaptive Management. *Frontiers in Marine Science* 7: 327. doi: 10.3389/fmars.2020.00327

Pranzini E, Cinelli I, Cipriani LE, Anfuso G (2020) An Integrated Coastal Sediment Management Plan: The Example of the Tuscany Region (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering* 8: 33. doi:10.3390/jmse8010033

Escudero M, Mendoza E, Silva R (2020) Micro Sand Engine Beach Stabilization Strategy at Puerto Morelos, Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering* 8: 247. doi:10.3390/jmse8040247

Focardi S, Pepi M (2023) Monitoring of Coastal Areas by Remote Sensing and Engineering Approaches. *Current Trends in Engineering Science* 3: 1033.

González-Dueñas C, Padgett JE (2021) Performance-Based Coastal Engineering Framework. *Frontiers in Built Environment* 7: 690715. doi: 10.3389/fbuil.2021.690715

Gracia A, Rangel-Buitrago N, Oakley JA, Williams AT (2018). Use of ecosystems in coastal erosion management. *Ocean & Coastal Management* 156: 277–289. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2017.07.009

Griggs G, Reguero BG (2021) Coastal Adaptation to Climate Change and Sea-Level Rise. *Water* 13: 2151. <https://doi.org/10.3390/w13162151>

IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2021.

Jackson DWT, Costas S, González-Villanueva R, Cooper A (2019) A global ‘greening’ of coastal dunes: An integrated consequence of climate change? *Global and Planetary Change* 182: 103026.

Kogure T (2022) Rocky coastal cliffs reinforced by vegetation roots and potential collapse risk caused by sea-level rise. *Catena* 217: 106457

Kristensen SE, Drønen N, Deigaard R, Fredso J (2016) Impact of groyne fields on the littoral drift: A hybrid morphological modelling study. *Coastal Engineering* 111: 13–22.

Lawlor P, Jackson DWT (2022) A Nature-Based Solution for Coastal Fore-dune Restoration: The Case Study of Maghery, County Donegal, Ireland. In *Human-Nature Interactions*, Ieva Misiune, Daniel Depellegrin, Lukas Egarter Vigl Eds., Springer, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-01980-7>

Minervino Amodio A, Di Paola G, Roskopf CM (2022) Monitoring Coastal Vulnerability by Using DEMs Based on UAV Spatial Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 11: 155.

Rashidi MAH, Jamal MH, Hassan MZ, Sendek MSS, Sopié MSL, Abd Hamid MR (2021) Coastal Structures as Beach Erosion Control and Sea Level Rise Adaptation in Malaysia: A Review. *Water* 13: 1741. <https://doi.org/10.3390/w13131741>

Pramanik MK, Biswas SS, Mondal B, Pal R (2016) Coastal vulnerability assessment of the predicted sea level rise in the coastal zone of Krishna–Godavari delta region, Andhra Pradesh, east coast of India. *Environment, Development and Sustainability* 18: 1635–1655.

Qi L, Wang M, Hu C, Holt B (2022) On the capacity of Sentinel-1 synthetic aperture radar in detecting floating macroalgae and other floating matters. *Remote Sensing of Environment* 280: 113188.

Ramli M, Karasu Tjr, Dawood ET (2013) The stability of gabion walls for earth retaining structures. *Alexandria Engineering Journal* 52: 705–710.

Rosati JD (2005) Concepts in sediment budgets. *Journal of Coastal Research* 21(2): 307–322. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Sarkar N, Rizzo A, Vandelli V, Soldati M (2022) A Literature Review of Climate-Related Coastal Risks in the Mediterranean, a Climate Change Hotspot. *Sustainability* 14: 15994. <https://doi.org/10.3390/su142315994>

Singhvi A, Luijendijk AP, van Oudenhoven APE (2022) The grey – green spectrum: A review of coastal protection interventions. *Journal of Environmental Management* 311: 114824

Toimil A, Camus P, Losada IJ, Le Cozannet G, Nicholls RJ, Idier D, Maspataud A (2020) Climate change-driven coastal erosion modelling in temperate sandy beaches: Methods and uncertainty treatment. *Earth-Science Reviews* 202: 103110

Toure S, Diop O, Kpalma K, Maiga AS (2019) Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8: 75. doi:10.3390/ijgi8020075

Valentine K, Mariotti G (2019) Wind-driven water level fluctuations drive marsh edge erosion variability in microtidal coastal bays. *Continental Shelf Research* 176: 76–89.

Vousdoukas MI, Mentaschi L, Voukouvalas E, Verlaan M, Jevrejeva S, Jackson LP, Feyen L (2018) Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature Communications* 9: 2360. DOI: 10.1038/s41467-018-04692-w

Yao H, Qin R, Chen X (2019) Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications – A Review. *Remote Sensing* 11: 1443. doi:10.3390/rs11121443