

Component T1: COMPONENT T1: ANALISI TRANSFRONTALIERA DELLE MISURE E DEI MONITORAGGI PER LA PREVISIONE DELL'EVOLUZIONE MORFODINAMICA DEI SISTEMI COSTIERI

Attività T1.2: Progettazione dei piani di monitoraggio morfosedimentologico e biologico della fascia costiera

Prodotto T1.2.2 – Protocollo metodologico transfrontaliero

Protocollo metodologico, contenente indicatori comuni, per la progettazione dei piani di monitoraggio morfosedimentologico e biologico della fascia costiera

- 1. Clima meteomarinario**
- 2. Coste alte**
- 3. Spiagge**
- 4. Bacini idrografici**
- 5. Habitat marino-costieri**

1. Clima meteomarino

Contributo tecnico del Partner LaMMA

1. Generalità

L'analisi critica dei sistemi di monitoraggio e della tipologia di dati monitorati, svolta all'interno dell'attività T1.1 del progetto con particolare riferimento alla conoscenza del clima meteo-marino, ha evidenziato come, nel complesso, le Regioni dello spazio di cooperazione transfrontaliero abbiano già a disposizione un patrimonio di metodologie di misura, di dati e anche di competenze in grado di soddisfare in maniera efficace le esigenze non solo dei piani di monitoraggio, ma anche delle attività connesse alla pianificazione e gestione della fascia costiera.

Occorre dire che questo patrimonio di metodologie, dati e competenze non appare sufficientemente condiviso né tra i vari territori, e nemmeno all'interno delle Regioni, dove spesso negli uffici e negli enti preposti non esiste una completa consapevolezza del potenziale di informazioni e conoscenze a disposizione. Questo comporta anche che auspicabili sviluppi e significativi progressi delle metodologie siano lasciati alla volontà di singoli enti (spesso enti di ricerca e università), che li svolgono all'interno di proprie attività di ricerca o servizio, ma non concordati e programmati sulla base delle esigenze legate al monitoraggio, alla pianificazione e alla gestione della fascia costiera.

Ad esempio, nella progettazione delle opere a mare è ancora in uso, presso vari uffici della pubblica amministrazione o nell'ambito di studi tecnici commissionati all'esterno, l'adozione di vecchie metodologie di stima del clima ondoso che appaiono oggi largamente obsolete e inadeguate alle necessità di avere dati affidabili e rappresentativi della particolare zona in cui vengono realizzate le opere.

Nell'ambito delle attività del progetto, a cominciare dalle schede di monitoraggio che sono state proposte alle regioni per indicare gli strumenti e le metodologie in uso ai fini di raccogliere i dati sul clima-meteomarino, è stato proposto di estendere l'attività in origine limitata al "clima ondoso", a tutti i dati di oceanografia fisica, in particolare relativi allo stato del mare, che sono necessari ai fini della realizzazione degli obiettivi del progetto.

Pertanto, a partire dagli obiettivi specifici del progetto MAREGOT, si ritiene che in questa attività vadano descritti i requisiti (definiti dagli enti che si occupano di gestione e pianificazione del territorio, inclusa la progettazione e gli studi sull'ambiente costiero) che vanno specificati perché tali dati (che definiremo come dati meteo-oceanografici) soddisfino le diverse esigenze.

Le specifiche tecniche che devono rispettare i dati meteo-oceanografici, in quanto necessari per lo svolgimento di specifiche attività (monitoraggio, progettazione, studi ambientali, protezione civile ecc.), non sono necessariamente legate alla particolare metodologia utilizzata per produrre i dati (e.g. osservazioni, modelli), che verrà specificata in dettaglio e applicata nelle aree pilota, nella successiva component T2.2 del progetto. È invece importante stabilire

quali sono le caratteristiche di qualità dei dati (oppure la loro affidabilità, nel caso in cui si tratti di dati previsionali), da soddisfare perché essi possano essere utilizzabili per le sopramenzionate attività lungo la costa.

I dati prodotti, in gran parte attraverso sistemi di elaborazione numerica opportunamente integrati con dati di osservazione, in funzione delle diverse esigenze, possono essere utilizzati così come sono, o abilitare la possibilità di produrre dati nuovi attraverso sistemi di modellazione numerica di dettaglio a scala litoranea.

2. I principali indicatori per il monitoraggio dello stato del mare, requisiti tecnici

2.1. Definizione degli obiettivi

Come già detto, la tipologia e le caratteristiche dei dati fisici di monitoraggio dello stato del mare richiesti varia a seconda degli specifici obiettivi delle attività da svolgere. Queste comprendono:

- interpretazione della dinamica dei sedimenti e dei fenomeni erosivi (che saranno poi dettagliati in T2.1.2 “Metodologia rischio erosione” anche in relazione a quanto prodotto nell’attività T2.2 “Metodologia dei fenomeni legati al bilancio sedimentario”);
- previsione del rischio a lungo termine (legato agli stessi fenomeni erosione, e agli effetti dei cambiamenti climatici compreso l’innalzamento del livello medio del mare).
- progettazione degli interventi lungo la costa;
- prodotti operativi (previsioni) ai fini della gestione del rischio a breve termine lungo la costa (dettagliati in T2.1.1 “Metodologia rischio mareggiate” anche in relazione a quanto prodotto nell’attività T2.5 “Gestione rischio costiero”)

In relazione alle altre azioni del progetto, pertanto possiamo formulare un quadro dei dati necessari per la redazione dei piani di monitoraggio, distinguendo i dati relativi al moto ondoso dagli altri dati meteo-oceanografici:

Tabella 1 – Obiettivi del monitoraggio dello stato del mare

Azioni	Dati di moto ondoso richiesti	Altri dati di fisica del mare richiesti
T2.2 “Metodologia bilancio sedimentario”	- serie storiche di moto ondoso (spettri e parametri di onda integrati), da utilizzare per modelli di trasporto solido litoraneo; - runup di onda;	- serie storiche dati di livello del mare lungo la costa; - stima di Sea Level rise; - correnti litoranee; - vento; - correnti costiere a scala regionale (per studi di dispersione dei sedimenti);
T2.3 “Coste Alte ”	- serie storiche di moto ondoso a scala costiera, da utilizzare per studi di impatto sulle coste alte;	

	- statistica degli estremi d'onda;	
T2.4 "Habitat ed ecosistemi marini e costieri"	- serie storiche di moto ondoso a scala costiera, da utilizzare per studi di impatto sugli habitat e di interazione con le caratteristiche biologiche ed ecosistemiche della costa;	- serie storiche dati di livello del mare lungo la costa (stima escursione tidale); - correnti costiere;
T2.5 "Gestione rischio costiero"	- previsioni meteomarine riguardanti parametri di onde integrati e non; - statistica degli estremi d'onda; - runup di onda;	- previsioni di correnti litoranee e rip currents; - dati di livello del mare lungo la costa;

Per quanto riguarda la progettazione delle opere di difesa o degli interventi lungo la costa, i dati necessari non differiscono da quanto sopra specificato, essendovi la necessità di disporre di serie storiche consistenti di parametri che siano rappresentativi delle condizioni locali: da questi dati sono poi dedotte le statistiche relative alle onde (normalmente associate ad un dato tempo di ritorno), utilizzate nel dimensionamento delle opere.

2.2 Tipologia di dati per il monitoraggio meteo-oceanografico della costa: sistemi di osservazione, modelli

I dati meteo-oceanografici relativi allo stato del mare lungo la costa vengono normalmente misurati con gli strumenti tradizionali di rilevamento in-situ (boe, correntometri, mareografi), tramite radar marini e in qualche caso tramite osservazioni satellitari (altimetro, scatterometro, ecc.). Va sottolineato come la gran parte dei dati a disposizione siano oggi prodotti tramite modelli numerici sia previsionali, sia di hindcast, analisi e rianalisi (modelli in cui sono assimilati dati osservati). I dati misurati sono in ogni caso necessari per l'elaborazione di statistiche, per verifica e confronto della qualità dei modelli numerici usati (validazione), per la calibrazione dei modelli stessi, e in alcuni casi per la loro assimilazione nei modelli di ricostruzione meteo-oceanografica. Nel caso di modelli previsionali, i dati sono inoltre necessari per valutare l'affidabilità delle previsioni.

Regionalizzazione dei dati

I dati di monitoraggio meteo-oceanografico devono essere rappresentativi delle condizioni locali lungo la costa, e quindi forniti ad una risoluzione di dettaglio che può variare in dipendenza dalle caratteristiche geomorfologiche della costa. È quindi importante comprendere il livello di dettaglio richiesto dalle attività di monitoraggio lungo la costa. Come informazione di massima si ritiene che i dati a scala costiera debbano essere adatti a descrivere la variabilità a scala inferiore o sensibilmente inferiore a 1 km. La scelta della risoluzione va comunque motivata sulla base di un'analisi fatta a priori riguardante:

- la conformazione della costa;
- la batimetria;
- le caratteristiche geomorfologiche e sedimentologiche della costa;
- la presenza di strutture antropiche;
- la presenza di caratteristiche naturali da preservare;

ecc.

Stima dell'incertezza

È importante che i dati prodotti, specialmente nel caso dei modelli, abbiano caratteristiche di qualità certificabile da un'analisi a priori.

- Nel caso di dati di analisi o di hindcast, è opportuno avere una caratterizzazione dell'errore che permetta di valutare l'accuratezza dei sistemi di calcolo adottati;
- Nel caso di dati previsionali, l'affidabilità della previsione va valutata in relazione alle osservazioni, e questo è importante soprattutto nella definizione delle soglie di allerta/allarme che dovranno tener conto del margine di incertezza previsionale;

Condivisione dei dati

È necessario indicare il grado di fruibilità dei dati prodotti dagli enti pubblici che ne sono responsabili, e fornire i dati secondo gli standard di interoperabilità definiti a livello comunitario.

Specifiche dei dati per livello di analisi

Un modo di definire le specifiche tecniche dei dati di monitoraggio meteo-oceanografico è di considerarli in rapporto agli obiettivi prefissati (paragrafo 2.1): non tutti gli studi infatti necessitano degli stessi dati, per cui non è possibile ordinare i dati specifici per gli studi costieri sulla base di specifiche tecniche definite a priori in maniera univoca. Si ritiene inoltre utile differenziare ogni tipologia di dati, sulla base di due distinti livelli:

- **Livello di base:** è il primo livello dei dati, ottenuti direttamente tramite le osservazioni in campo o tramite l'output di modelli numerici; la conoscenza acquisita a questo livello permette inoltre di abilitare altre modalità di acquisizione (ad esempio, quando i dati sono utilizzati come condizione al contorno di un modello che produce altri dati a scala di dettaglio).
- **Livello avanzato:** è un livello di dati che non può prescindere dalle informazioni acquisite al livello di base. Queste ultime vengono elaborate per produrre informazioni ulteriori o di maggior risoluzione/dettaglio.

Per alcuni studi può essere sufficiente una semplice analisi del clima meteomarinario, che metta a disposizione dati d'onda sintetici quali altezza d'onda, direzione e periodo. Ai fini dell'utilizzo di questi dati nella progettazione, oppure nelle analisi di rischio, è necessario avere a disposizione serie storiche di dati

sufficientemente lunghe (non meno di 20-30 anni di dati), mentre in altri casi, ovvero quando non è necessario studiare gli estremi ma sono maggiormente interessanti le condizioni “medie”, una semplice analisi tabellare che mette assieme, ad esempio, per quanto riguarda le onde, dati di frequenza, intensità e direzione dei parametri in esame può essere sufficiente .

Tabella 2 – Parametri di moto ondoso

Livello di dettaglio	Tipo di dato	Modalità di misura	Risoluzione spaziale	Risoluzione temporale	Lunghezza serie storica ai fini delle elaborazioni statistiche
<i>Livello base</i>	H_s D_p T_p Spettro di energia	1) In-situ: boe o misure indirette da wave radar 2) modelli di hindcast/forecast delle onde	< 1 km	min. 3 h.	20-30 anni
<i>Livello avanzato</i>	Altezza d’onda al frangimento (H_b) Run-up Setup d’onda Correnti litoranee	1) osservazioni visuali, webcam 2) modelli di moto ondoso a scala litoranea/costiera	50-100 m	min. 1-3 h.	2-5 anni

I parametri di moto ondoso necessari per gli studi costieri sono indicati in Tab. 2. La conoscenza di questi dati a livello di base permette poi, tramite modelli di calcolo, di ricavare informazioni di dettaglio a scala costiera (livello avanzato) tramite metodologie di regionalizzazione dei dati. In questo modo è possibile determinare parametri normalmente usati negli studi costieri, quali:

- l’altezza d’onda al frangimento H_b (utilizzata ad es. in molte formule “bulk” relative al trasporto solido potenziale litoraneo)
- il runup d’onda (massima risalita delle onde sulla spiaggia)
- il setup d’onda (risalita del livello medio del mare sulla spiaggia)
- le correnti litoranee (normalmente fornite nella componente long-shore e cross-shore)

Tabella 3 – Parametri meteo-oceanografici

Livello di dettaglio	Tipo di dato	Modalità di misura	Risoluzione spaziale	Risoluzione temporale	Lunghezza serie storica ai fini delle elaborazioni statistiche
<i>Livello base</i>	Flussi di massa, energia, quantità di moto sulla superficie del mare. Dati di vento. Portate fluviali	1a) In-situ (stazioni idro-termo-pluviometriche, idrometri, misure di livello o di portata) 1b) satelliti 2) modelli di	1-10 km	Min. 1 h	3-10 anni

		hindcast/forecast meteorologici e idrologici			
<i>Livello avanzato</i>	Prodotti di oceanografia costiera a scala regionale (onde, correnti, temperatura, livelli, salinità)	1) Serie storiche di dati in-situ e satellitari 2) Forecast di modelli climatici a scala globale	1-10 km	Min. 1 h	3-10 anni

I parametri meteo-oceanografici sono indicati in tab. 3. Normalmente, tranne nel caso del vento, non hanno un interesse di per sé (almeno a livello di base) ma sono usati come forzante di modelli di circolazione a scala regionale e costiera (livello avanzato) che possono fornire informazioni utili sul trasporto dei sedimenti a scala regionale.

Tabella 4 – Dati di livello del mare

<i>Livello dettaglio</i>	<i>Tipo di dato</i>	<i>Modalità di misura</i>	<i>Risoluzione spaziale</i>	<i>Risoluzione temporale</i>	<i>Lunghezza serie storica ai fini delle elaborazioni statistiche</i>
<i>Livello base</i>	Misure di livello Correnti geostrofiche	1) in situ (mareografi) o satellitari 2) modelli idrodinamici a scala di bacino e regionale comprensivi della descrizione della marea astronomica	1-10 km	Min. 1 h	5-10 anni
<i>Livello avanzato</i>	Informazioni climatologiche (SLR – evoluzione del clima meteo marino)	1) Serie storiche di dati in-situ e satellitari 2) Forecast di modelli climatici a scala globale	10-100 km	Min. 1 anno	30-50 anni

Infine i parametri di livello del mare sono indicati in tab. 4. Possono essere usati per dedurre informazioni a larga scala (strutture di circolazione), ma l'analisi delle serie storiche può fornire importanti informazioni sui trend, ad esempio relativi all'innalzamento del livello medio del mare o Sea Level Rise (SLR).

Requisiti tecnici dei dati meteo-oceanografici per il monitoraggio costiero

I dati meteo-oceanografici di interesse per il monitoraggio costiero sono definiti a livello internazionale. La definizione di alcuni di questi parametri è stata aggiornata nel tempo, ad esempio, il concetto altezza d'onda significativa, riferendosi ad uno stato di mare caratterizzato da una singola onda regolare "energeticamente equivalente" allo stato di mare costituito da onde irregolari e multidirezionali, era in origine determinato come media del terzo delle onde più

alte ($H_{1/3}$), mentre oggi si preferisce definirlo sulla base dello spettro di energia delle onde (H_{m0}). In realtà esistono molti parametri aggiuntivi che sono utilizzati in molti studi sulla dinamica dei litorali o nella progettazione delle opere a mare, ad es. $H_{1/10}$ (media del decimo dell'altezza delle onde più alte), $T_{1/10}$ (media del decimo del periodo associato alle onde più alte), ripidità d'onda, spread angolare, ecc.

Nel seguito ci riferiamo quindi solo agli standard definiti dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (World Meteorological Organization - WMO) <https://www.wmo-sat.info/oscar/>

Le specifiche definite dal WMO riguardano soprattutto i prodotti che derivano dall'osservazione della Terra (osservazione in-situ e osservazione remota), ma le caratteristiche richieste a questi stessi parametri possono essere adattate all'ambito costiero previa modifica delle specifiche tecniche richieste ai dati che derivano soprattutto da modelli di calcolo opportunamente integrati con dati in-situ e satellitari.

In Tab. 5, pertanto, compaiono le definizioni dei parametri secondo quanto stabilito dal WMO. Riprendendo le tre tipologie di dati descritte nel precedente paragrafo si è definito: un livello 1 (relativo ai parametri di moto ondoso, che normalmente sono i più richiesti in ambito costiero), un livello 2 (parametri meteo-oceanografici che abilitano l'utilizzo di modelli idrodinamici a scala regionale e costiera), un livello 3 (livello del mare). Questi livelli non sono elencati in base alla loro priorità, perché in certi studi, ad esempio a scala portuale, o in ambiente lagunare, potrebbero essere più rilevanti gli studi fatti sul livello del mare misurato tramite mareografi rispetto agli altri parametri.

Tabella 5 – Definizione dei parametri meteo-oceanografici in base alle specifiche WMO

Variabile	Nome sintetico	Unità di misura	Descrizione	Livello
Altezza d'onda significativa	H_s	m	Tradizionalmente definita come ampiezza media del terzo delle onde più alte, ovvero $H_{1/3}$. Spesso, anziché con $H_{1/3}$ si preferisce sostituirla con H_{m0} che corrisponde a quattro volte la radice quadrata del momento di ordine zero dello spettro di energia. La differenza tra $H_{1/3}$, che esprime un concetto puramente statistico e H_{m0} , che invece rappresenta un equivalente energetico, è praticamente trascurabile.	1 onde
Direzione d'onda dominante	D_p	gradi	È la direzione dell'onda più energetica dello spettro, anche detta direzione di picco (direzione associata al picco dell'energia d'onda). In caso di spettro multimodale, può essere utile associare alla direzione di picco la direzione media d'onda, definita come media pesata di tutte le direzioni d'onda che rappresentano lo stato del mare.	1 onde
Periodo d'onda dominante	T_p	s	Il periodo dell'onda più energetica nello spettro delle onde, anche detto periodo di picco. In caso di spettro multimodale, può essere utile associare al periodo di picco il periodo medio d'onda, definito come media pesata di tutti i periodi d'onda che rappresentano lo stato del mare.	1 onde
Spettro di energia in frequenza	$S(f)$	$m^2 Hz^{-1}$	Variabile 1D a cui ci si riferisce spesso come "spettro d'onda" monodimensionale. Descrive l'energia d'onda in ciascuna banda di frequenza (ad esempio 25 bande di frequenza) indipendentemente dalla direzione di propagazione	1 onde
Spettro di energia direzionale in frequenza	$S(f, \theta)$	$m^2 Hz^{-1} rad^{-1}$	Variabile 2D a cui ci si riferisce spesso come "spettro d'onda" direzionale. Descrive l'energia d'onda che viaggia in ciascuna banda di direzione $\Delta\theta$ e banda di frequenza Δf (ad esempio, 24 settori di azimut distinti ciascuno in 15° di larghezza e 25 bande di frequenza)	1 onde
Intensità di precipitazione alla superficie	P	mm / h	Intensità di precipitazione che raggiunge la superficie del mare	2 meteo-ocean

Flusso di massa alla superficie del mare	SMF	mm / h	Flusso di massa alla superficie del mare, altrimenti definito come differenza tra l'evaporazione e la precipitazione (E-P)	2 meteo-ocean
Flusso termico radiativo superficiale	SHF	W m ⁻²	Flusso termico radiativo di superficie	2 meteo-ocean
Salinità della superficie del mare	SSS	psu	Salinità dell'acqua di mare nello strato superficiale (superiore ~ 1 m se osservato in MW). In mare aperto il termine corretto dovrebbe essere "alinità" con riferimento alla diversità di sali coinvolti.	2 meteo-ocean
Temperatura della superficie del mare	SST	°K o °C	Temperatura dell'acqua di mare in superficie. La temperatura "bulk" si riferisce alla profondità di circa 2 m, la temperatura "skin" si riferisce allo strato superficiale di spessore 1 mm.	2 meteo-ocean
Pressione atmosferica in superficie	$p(0)$	hPa	Pressione della colonna d'aria misurata 2m sopra la superficie del mare	2 meteo-ocean
Vento superficiale	WV	ms ⁻¹	Componente orizzontale (2D) del vettore di velocità del vento (3D) convenzionalmente misurata a 10 m di altezza.	2 meteo-ocean
Correnti superficiali (vettore)		cm s ⁻¹	Velocità della corrente marina misurata sulla superficie del mare	2 meteo-ocean
Anomalia del livello del mare		cm	Anomalia dell'altezza della superficie del mare, misurata come la differenza tra la migliore stima dell'altezza della superficie del mare osservata dal satellite e l'altezza media della superficie del mare	3 livelli
Topografia dinamica oceanica		cm	Deviazione del livello del mare dal geoide causato dalle correnti oceaniche (dopo le correzioni per le maree e gli effetti della pressione atmosferica)	3 livelli

I dati di livello 1, relativi alle onde, includono sia parametri "sintetici" o integrati delle onde, sia gli spettri di energia d'onda (1D e 2D) a partire dai quali è peraltro possibile dedurre tutti gli altri parametri. Si noti che, specialmente per le attività che richiedono l'utilizzo di modelli a scala locale, l'informazione spettrale è più corretta e completa e dovrebbe essere specificata come prioritaria.

I dati di livello 2, che abbiamo definito come parametri meteo-oceanografici, includono parametri meteorologici (vento, pressione, radiazione solare, ecc.) che possono essere interessanti di per sé, ma anche essere utilizzati come forzante dei modelli idrodinamici e di moto ondoso. Parametri oceanografici come le correnti superficiali, la temperatura e la salinità, sono ricavate principalmente tramite modelli o tramite osservazioni di superficie (es. radar HF, dati satellitari, ecc.). La conoscenza in dettaglio di questi parametri a scala regionale e costiera, insieme ad altri parametri qui non menzionati (torbidità, concentrazione di sedimenti ecc.) permette di realizzare studi relativi all'influenza dei corsi d'acqua terrestre nell'alimentazione dei litorali.

I dati di livello 3 (livelli), sono richiesti sia nell'ambito di studi specifici lungo la costa o per la circolazione a scala regionale, sia per gli studi climatologici legati all'innalzamento del livello medio del mare.

I parametri definiti dal WMO sono poi classificati in base ad obiettivi quali, caratteristiche tecniche del dato (frequenza temporale con cui il dato è fornito, risoluzione) e affidabilità, riferita genericamente come incertezza. Per ognuna di queste tre caratteristiche sono definite delle soglie.

- **Soglia obbiettivo:** è il requisito "ideale", che – se raggiunto- non renderebbe necessari ulteriori miglioramenti nei modelli e nei sistemi di osservazione.
- **Soglia di accettabilità:** è il requisito minimo da garantire per essere sicuri che il dato sia utile.

- **Soglia di miglioramento:** è un livello intermedio tra la soglia obiettivo e quella di accettabilità. Se raggiunta, si può dire di avere realizzato un significativo miglioramento nelle procedure di produzione di un certo dato. Sotto certi aspetti la soglia di miglioramento potrebbe essere considerata come un livello ottimale, dal punto di vista di un'analisi costi-benefici, quando si pianifica o si progetta un sistema di osservazione.

Tab. 6 – Requisiti tecnici dei dati meteo-oceanografici in base alle specifiche WMO, modificati in base alle esigenze dei sistemi di osservazione e modellazione a scala costiera.

Variable	Incertezza:			Risoluzione orizzontale:			Frequenza:		
	- obiettivo	- soglia di miglioramento	- soglia di accettabilità	- obiettivo	- soglia di miglioramento	- soglia di accettabilità	- obiettivo	- soglia di miglioramento	- soglia di accettabilità
Altezza d'onda significativa	0.1 m	0.25 m	0.50 m	0.1 km	1 km	10 km	15 min	60 min	3 h
Direzione d'onda dominante o di picco	10°	20°	30°	0.1 km	1 km	10 km	15 min	60 min	3 h
Periodo d'onda dominante o di picco	0.1 s	0.5 s	1 s	0.1 km	1 km	10 km	15 min	60 min	3 h
Spettro di energia d'onda 1D	0.1 m ² · Hz ⁻¹	0.15 m ² · Hz ⁻¹	0.2 m ² · Hz ⁻¹	1 km	10 km	25 km	15 min	60 min	3 h
Spettro direzionale di energia d'onda	0.1 m ² · Hz ⁻¹ · rad ⁻¹	0.15 m ² · Hz ⁻¹ · rad ⁻¹	0.2 m ² · Hz ⁻¹ · rad ⁻¹	1 km	10 km	25 km	15 min	60 min	3 h
Intensità di precipitazione	0.2 mm/h	0.5 mm/h	2 mm/h	1 km	5 km	25 km	30 min	3 h	12 h
Flusso di calore totale sulla superficie libera	10 W/m ²	20 W/m ²	50 W/m ²	2 km	10 km	25 km	1 h	3 h	24 h
Flusso di massa totale sulla superficie libera	0.1 mm/h	0.5 mm/h	1 mm/h	2 km	10 km	25 km	1 h	3 h	24 h
Salinità superficiale del mare	0.05 psu	0.1 psu	0.2 psu	0.5 km	1 km	10 km	1 h	3 h	24 h
Temperatura superficiale del mare	0.1 K	0.5 K	1 K	0.5 km	1 km	10 km	1 h	3 h	24 h
Pressione superficiale	1 hPa	5 hPa	10 hPa	2 km	10 km	25 km	1 h	3 h	6 h
Vento superficiale	0.5 m/s	2 m/s	5 m/s	2 km	10 km	25 km	30 min	1 h	6 h
Corrente marina superficiale (vettoriale)	5 cm/s	10 cm/s	20 cm/s	0.5 km	2 km	5 km	1 h	3 h	12 h
Anomalia del livello marino (SSA)	0.03 m	0.07 m	0.1 m	1 km	5 km	20 km	1 h	12 h	24 h
Topografia dinamica oceanica	1 cm	3 cm	10 cm	0.1 km	0.5 km	10 km	1 h	12 h	24 h

1.3. Specifiche sui dati necessari all'implementazione dei modelli a scala costiera

Molte applicazioni e servizi sulla fascia costiera si basano sull'implementazione di modelli di calcolo a scala litoranea, che sono normalmente utilizzati per vari scopi e obiettivi nell'ambito generale della Gestione Integrata della Zona Costiera. Gli obiettivi principali di questi modelli sono:

- la trasposizione del clima ondoso (da largo a sottocosta);
- la caratterizzazione dell'idrodinamica e del moto ondoso a scala costiera, finalizzata al trasporto di sedimenti, alla progettazione e alla valutazione di impatto ambientale delle opere a mare, agli studi morfodinamici a scala costiera;
- la quantificazione dell'impatto delle onde sulla costa (runup, flooding), ai fini della gestione del rischio;
- le applicazioni di water quality a scala costiera e litoranea (per l'implementazione di Direttive Europee quali la direttiva quadro sulle acque, quella sulla balneazione, o la Strategia Marina).

I modelli, normalmente, richiedono condizioni al contorno "di largo" (sul bordo offshore dei modelli) che possono essere legate alle condizioni di moto ondoso, di elevazione della superficie del mare (marea o altro), di corrente marina:

1. nel caso dei modelli di moto ondoso a scala locale, quando possibile sono da preferire le condizioni al contorno fornite come spettri di energia d'onda lungo il bordo. In alternativa si possono utilizzare dati sintetici (H_s , T_p , D_p) trasformati in spettri parametrici tipo JONSWAP. Tuttavia si ritiene che questa approssimazione sia poco adatta alle applicazioni costiere, come ad esempio nei modelli previsionali;
2. nel caso di modelli idrodinamici a scala locale, la marea viene normalmente specificata sia come livello sia in termini di armoniche fondamentali (componenti principali diurne e semidiurne); la corrente oceanografica sul bordo offshore dei modelli viene spesso trascurata, ma nel caso in cui si preferisca includerla è bene che il passaggio da un modello a più larga scala ad uno di dettaglio, non avvenga mai superando un fattore di nesting più piccolo di 1:5 o al massimo 1:7 (raccomandato 1:3). Questo significa che se i dati a larga scala disponibili, ad esempio tramite il servizio europeo Copernicus Marine Environmental and Monitoring Service (CMEMS), sono attualmente forniti a circa 4 km di risoluzione nel Mediterraneo, modelli a scala costiera che ad esempio richiedono 50 m di risoluzione (e in molte applicazioni questa risoluzione è inadeguata), possono essere realizzati solo tramite un minimo di 2-3 livelli di nesting in cascata, o in alternativa tramite modelli a maglia non strutturata.

2. Coste alte

Contributo tecnico del Partner UNICA

1. Introduzione

La conoscenza dei processi di erosione e modificazione della linea di costa riveste un'importanza focale nella predisposizione dei piani di monitoraggio dei sistemi costieri finalizzati sia alla tutela della salute pubblica che del bene ambientale. Inoltre, la predisposizione di interventi di salvaguardia deve essere sia preceduta che seguita dall'attento monitoraggio del sistema nel suo complesso.

Si tratta quindi di impostare un'attività di pianificazione delle azioni di monitoraggio, che non siano solo finalizzate alla verifica della perdita del bene in termini di modifiche paesaggistiche e riduzione di volumi (arretramento della falesia), ma anche alla possibilità di intervenire in modo adeguato, rispettoso di tutte le componenti ecosistemiche.

La comprensione dei processi di natura geologica, che concorrono all'innesco di fenomeni di instabilità permette di adeguare la scelta dei parametri di monitoraggio alle condizioni di evoluzione geomorfologica locale. Riconoscere i meccanismi di evoluzione e comprenderne le cause è quindi il primo passo per la scelta del sistema di monitoraggio più idoneo.

In letteratura, per le falesie, è spesso riportata la distinzione tra frane innescate da processi tipicamente marini, in genere l'effetto delle onde per scalzamento alla base lungo il solco di battente, e processi di versante, quelli che generano le frane, ed anche il flusso delle acque sotterranee o i deflussi superficiali (nel caso di coste costituite da rocce facilmente erodibili). E' però evidente che esiste una forte interdipendenza tra gli stessi (lo scalzamento alla base produce un'erosione continua ma di piccola entità del piede della falesia, ma alla lunga rende instabile anche la parte superiore movimentando volumi imponenti in un tempo brevissimo).

La variabilità delle coste permette di sottolineare l'estrema attenzione che deve essere data alla scelta del modello evolutivo su cui basare un'attività di controllo continuo dei settori costieri

L'ambito costiero, oggetto delle osservazioni, viene diviso nelle unità fisiografiche subaerea e subacquea, che comportano un approccio differente per la definizione dei parametri da misurare. Una ulteriore peculiarità, che caratterizza lo studio dell'instabilità dei versanti costieri, è l'interazione delle superfici rocciose con il moto ondoso. Le dinamiche del moto ondoso, sia nel normale regime che negli eventi estremi, devono essere considerate, sia come impatto sulle pareti rocciose e sia come generatori delle correnti litorali e di piattaforma prossimale. Su quest'ultimo aspetto ad oggi sono note soprattutto esperienze che riguardano manufatti, mentre poco esiste sulla diretta interazione con versanti naturali.

Di seguito sono schematicamente descritti gli studi multidisciplinari che servono alla caratterizzazione delle aree di studio, e anche ad individuare le aree instabili e potenzialmente instabili. Quindi vengono riportati i processi ed i criteri per il loro monitoraggio, tramite una prima individuazione degli indicatori.

2. I principali indicatori per il monitoraggio dei fenomeni di instabilità delle coste alte

2.1. Le scale spaziali e temporali

E' importante definire la dimensione spaziale del processo da monitorare. Infatti, se da un lato è necessario, dal punto di vista pianificatorio, poter disporre di una conoscenza diffusa dei fenomeni di instabilità e di potenzialità al dissesto lungo le coste, è noto che queste informazioni non sono ancora disponibili per tutte le regioni dello spazio transfrontaliero. Dell'area transfrontaliera. Carenza, d'altronde, acclarata anche per le frane che avvengono nell'entroterra, nonostante le condizioni logistiche siano meno problematiche, e da cui deriva l'intrinseca difficoltà a definire una corretta zonazione della pericolosità geomorfologica. Diventa quindi molto problematico definire gli ambiti locali di riferimento per poter progettare un sistema di monitoraggio dei fenomeni di instabilità, che sia efficace e che risponda alle esigenze di gestione dei litorali. Laddove sono presenti fenomeni di frana in atto, i sistemi di monitoraggio più idonei dovranno essere basati sull'attenta analisi delle cause di innesco e pertanto l'area di intervento potrebbe essere molto variabile, dall'intero bacino idrografico e idrogeologico sotteso e lo spazio di mare antistante sino al solo blocco in frana.

Un altro aspetto di estrema importanza, poiché il monitoraggio è un'azione di osservazione nel tempo, è quello di definire l'evoluzione temporale dei fenomeni e la necessità di prevedere osservazioni ripetute. Sotto questo punto di vista sono diverse le scale temporali da prendere in considerazione:

- a) quella geologica, riferita quantomeno all'attuale periodo climatico, e quindi nell'ordine dei 10^4 anni, e forse ancora più ristretta agli ultimi 10.000 anni, da quando la curva di risalita olocenica del livello del mare si è stabilizzata diventando meno ripida, in quanto l'attuale configurazione è a grande scala il frutto di questa evoluzione;
- b) quella di epoca storica, in teoria osservabile dallo studio con le opere antropiche, circa gli ultimi 3.000 anni nel caso della Sardegna
- c) quella recente, determinabile con l'uso delle foto storiche e delle cartografie disponibili che permettono di risalire in genere agli ultimi 70 anni, in alcuni casi anche oltre i 100 anni.

E' evidente che ognuna di queste scale temporali ha un significato differente, soprattutto nell'analisi dei tempi di ritorno degli eventi franosi, ma tutte sono indispensabili per la comprensione dell'evoluzione delle coste alte prese in considerazione.

2.2. Monitoraggio del settore subaereo

Gli ambiti fisiografici specifici di riferimento sono quelli delle falesie e dei versanti.

La scelta delle azioni di monitoraggio da mettere in atto per controllare nel tempo i possibili indicatori per la previsione di innesco dei movimenti franosi si basano sulla caratterizzazione geologica dei tratti costieri. Le caratteristiche litologiche, geomorfologiche, strutturali, geotecniche, geomeccaniche e idrogeologiche costituiscono la conoscenza di base e devono quindi essere definite in maniera approfondita in via preliminare secondo le metodologie proposte nel progetto MAREGOT nell'ambito della component T.2 e specificatamente nell'attività T2.3-Metodologia di analisi dei fenomeni legati all'evoluzione delle coste alte.

Queste indagini sono essenziali per la progettazione di sistemi di monitoraggio efficaci, che tengano conto della complessità dell'evoluzione naturale delle pareti rocciose che può condurre all'innesco di fenomeni di frana nelle aree costiere. Sinteticamente si riportano i processi che sono noti per avere un ruolo importante nel favorire l'instabilità dei versanti in roccia e che perciò, oltre che riconosciuti, vanno anche dimensionati quantitativamente:

- Processi di alterazione e *weathering*: carsismo (rocce carbonatiche), aloclastismo, rigonfiamento minerali argillosi, idrolisi dei silicati (rocce cristalline e vulcaniche).
- Processi di erosione: erosione areale, aree a erosione diffusa, aree a erosione lineare, erosione lineare accelerata, erosione calanchiva, testata in erosione retrogressiva.
- Processi gravitativi: frane di crollo, frane di crollo ribaltamento, frane di scivolamento (planare, rotazionale)
- Processi di arretramento delle falesie: morfometria del solco di battente, piattaforme costiere emerse e sommerse (vedi paragrafo su Monitoraggio del settore subacqueo).

A seguito di questa analisi potranno essere applicati i sistemi di monitoraggio specifici, da svolgersi secondo le metodologie più idonee e che competono a più discipline all'interno delle scienze geologiche con anche diverse tecniche di rilevamento, tra gli altri, ma non solo: rilevamento geologico, strutturale, geomorfologico, idrogeologico, geomeccanico sul campo con misure dirette e prove in situ e con prove di laboratorio, telerilevamento. Ad esempio, qualora venga rilevata la presenza di cinematismi superficiali, questi potranno essere controllati attraverso misure fotogrammetriche e da *remote sensing*, topografiche (livellazioni, triangolazioni, trilaterazioni, distanziometriche, ecc.), misure delle discontinuità, misure deformometriche, valutazione delle pressioni interstiziali.

Le misure a supporto delle attività di rilevamento diretto sono quelle che potranno definire la variazione multitemporale della linea di costa.

Ai fini del monitoraggio, in funzione dei processi riconosciuti e del loro impatto, l'ambito territoriale di riferimento per lo studio dei processi di instabilità dei versanti costieri dovrà essere esteso, laddove necessario, al bacino idrografico e a quello idrogeologico, da caratterizzarsi nelle sue componenti fondamentali: idrologia di superficie, presenza di emergenze e di punti di prelievo, distinzione dei complessi idrogeologici, quota piezometrica, direzione di flusso, coefficiente di permeabilità, conducibilità e trasmissività idraulica.

2.2.1 Gli strumenti per il monitoraggio e gli indicatori

Gli strumenti e le tecniche di monitoraggio possono essere molteplici, in funzione degli indicatori che si intende rilevare, dell'accuratezza delle misure e della loro frequenza. Si possono distinguere le misure dirette da quelle da remoto, tipiche del telerilevamento. Le diverse condizioni geologiche dei siti, ma anche la loro accessibilità, da verificarsi ogni volta, definiranno tipologia, numero e frequenza delle misure da svolgere. Così come a loro volta questi parametri determineranno il tipo di analisi dei dati.

Tra le misure dirette, il dettaglio necessario per studiare la potenzialità al dissesto del fronte roccioso è associato con:

- la caratterizzazione geotecnica (angolo di attrito, coesione, peso di volume, contenuto d'acqua, Limiti di Atterberg, analisi granulometriche, pressioni neutre, permeabilità);
- il monitoraggio dello stato delle discontinuità con misure dirette e su campioni in laboratorio (giacitura, spaziatura, apertura, alterazione, JRC, condizioni idrauliche, RMR, resistenza a compressione uniassiale, resistenza alla trazione, resistenza alla flessione, modulo di elasticità, ecc.);
- il monitoraggio delle condizioni fisiche del fronte nelle sue componenti di instabilità mediante controllo con strumenti allocati (estensimetri, distanziometri, clinometri, fessurimetri, celle di carico), e con una rete di sensori wireless (SEED), misure con tacheometro laser, chiodi e piastre per misure micrometriche multitemporali, picchetti metrati, rilievi topografici DGPS;
- il monitoraggio delle componenti idrogeologiche, tra le quali le misure piezometriche, della portata delle sorgenti e della qualità delle acque sotterranee;

Le tecniche di Telerilevamento, per loro natura, offrono la possibilità di monitorare il territorio con sensori capaci di rilevare informazioni anche quando di difficile acquisizione diretta. Inoltre la possibilità di ripetere misure secondo protocolli standard di acquisizione e con le medesime caratteristiche strumentali, consente di pianificare le attività di monitoraggio più idonee ad integrazione di quelle dirette o con strumenti diversi.

Gli strumenti del Telerilevamento possono pertanto essere utilizzati in modo specifico in questo contesto utilizzando sia dati acquisiti da aereo e da satellite (foto aeree, immagini ottiche e radar) ma anche le tecnologie di *proximal sensing* che permettono attraverso acquisizioni da UAV di rilevare nel dettaglio le

pareti rocciose. Questi apparecchi possono essere equipaggiati con sensori ottici, *laser scanner*, termocamere e pertanto sono gli strumenti più efficaci sia per la caratterizzazione che per il monitoraggio dei processi basato sulla rilevazione di anomalie su serie multitemporali (*change detection*). Sulla base di queste acquisizioni diventano indicatori per la previsione di innesco di movimenti franosi:

- le variazioni di forma del fronte roccioso estratte da modellazione 3D, rilievi morfometrici delle morfosculture, rilievi multi-temporali delle superfici di denudamento (misure in mq/anno, da convertire con misure dirette in misure di mobilitazione di sedimenti/blocchi);
- l'arretramento del ciglio delle scarpate da rilievo aerofotografico o satellitare ad altissima risoluzione (misure in metri/anno) ed eventuale misura dei tempi di ricorrenza dei processi attivi.

2.3 Monitoraggio del settore subacqueo

L'ambito fisiografico è quello che va dalla base della parete sommersa verso la piattaforma continentale. Le misure riguardano pertanto la variazione del fondo marino, nelle sue diverse articolazioni. In questo spazio si sviluppano, con dinamiche a volte differenti da quelle del settore emerso, fenomeni di accumulo, trasporto ed erosione dei sedimenti generati dagli eventi franosi. In questo senso, il rilevamento geomorfologico subacqueo di dettaglio nella fase di caratterizzazione assume particolare importanza, proprio perché la variazione delle morfologie sommerse diventa un elemento fondamentale del monitoraggio.

La geomorfologia subacquea della fascia pericostiera e piede di falesia, permetterà di verificare a mare le ipotesi interpretative.

2.3.1 Gli strumenti per il monitoraggio del settore subacqueo e gli indicatori

Le tecniche di acquisizione dei dati morfobatimetrici permettono di raggiungere un dettaglio da metrico a centimetrico, consentendo in tal modo di valutare le variazioni morfologiche e volumetriche dei sedimenti sul fondo. In particolare vanno ricostruite:

- la morfobatimetria interpolata della fascia pericostiera: con rilievo batimetrico *single beam* a tolleranza centimetrica;
- la morfobatimetria a superficie continua pericostiera: con rilevamento *multibeam* ad alta risoluzione;
- la morfologia sonar della fascia pericostiera: con rilevamento *side scan sonar*: sss al traino, sss a scafo.

Questi dati, insieme al rilevamento diretto in immersione al piede della falesia ed il campionamento dei prodotti di crollo/depositi da frana costiera, consente il controllo delle variazioni avvenute tra campagna di rilevamento successive, integrate con il confronto multi temporale tra sezioni topografiche, per valutare le variazioni volumetriche roccia/sedimenti ed il confronto multi temporale dei sonogrammi.

Sulla base della mappatura delle strutture sedimentarie vengono tratte indicazioni sulla dinamica delle correnti trattive di fondo.

2.4. Monitoraggio del moto ondoso e strumenti di misura

Come detto in premessa, i fenomeni di instabilità lungo le coste sono condizionati fortemente dall'impatto e dal lavoro continuo delle onde sulle pareti rocciose.

Diversi modelli possono essere applicati per una valutazione dell'effetto del moto ondoso e sulla base del modello più idoneo per ogni contesto fisiografico, può essere programmata l'attività di monitoraggio finalizzata a raccogliere le informazioni necessarie. La possibilità e l'eventuale efficacia nell'applicare a versanti naturali i modelli studiati per valutare l'effetto delle onde su strutture artificiali sarà oggetto dell'attività T2.3 e costituisce quindi in questa fase un elemento non ancora completamente definibile.

2.4.1 Analisi degli eventi estremi

A partire dai dati di moto ondoso misurati da una boa ondometrica o ricostruiti con modelli di *hindcasting* in un punto a largo rappresentativo del paraggio di interesse, saranno effettuate delle analisi degli eventi estremi per individuare eventuali trend climatici e le eventuali conseguenze in termini di accresciute sollecitazioni sulle strutture costiere. Verranno considerate serie storiche di dati omogenei per settore di provenienza, anche al fine di evidenziare diversi comportamenti statistici. Nello specifico, l'analisi vorrebbe valutare il livello di adattamento di diverse funzioni di probabilità, oltre a quelle (Gumbel e Weibull) maggiormente utilizzate in ambito marittimo. Per ciascuna distribuzione di probabilità verranno inoltre considerati diversi metodi di stima dei parametri (e.g., metodo dei momenti, metodo dei minimi quadrati, metodo della massima verosimiglianza, etc.). I criteri di scelta delle distribuzioni (Sulis et al., 2017) saranno quelli utilizzati da Goda, secondo cui la distribuzione che meglio si adatta ai valori campionari è quella con il più alto coefficiente di correlazione e il test del Chi-quadro secondo il metodo di Fangiun et al. (2012). Il confronto con precedenti analisi degli eventi estremi su serie di dati più corte permetterà di evidenziare eventuali cambiamenti nei valori di stima dei parametri delle distribuzioni considerate (e quindi nelle loro forma) a cui corrispondono diversi valori attesi delle altezze d'onda per fissati tempi di ritorno.

2.4.2 Analisi del clima ordinario

La serie storica dei dati in termini di:

1. altezza significativa (Hs),
2. periodo medio (T01),
3. direzione media (MWD)

al largo saranno utilizzati come condizioni al contorno di modelli per il loro trasferimento sottocosta al fine di fornire campi da cui estrarre i valori nei punti di interesse. Precedenti lavori potranno essere utilizzati per il confronto nella propagazione del moto ondoso dal largo alla riva tra modelli analitici semplificati e modelli numerici commerciali ai volumi finiti su maglia non strutturata, di tipo spettrale di terza generazione. Il trasferimento del clima ondoso a costa permetterà di rappresentare il clima ondoso sotto forma di tabelle bivariate e rosa, e realizzare delle analisi sul contributo energetico dovuto al moto ondoso.

2.4.3 Gli strumenti per il monitoraggio del moto ondoso e gli indicatori

Le analisi di cui sopra, e in particolare il modello di trasferimento del clima ondoso, potrebbero essere integrate dalle misure realizzate con una boa ondometrica, equipaggiata con un sensore meteorologico e un correntometro ADCP. Posizionata a breve distanza dalla costa su un punto rappresentativo del paraggio di interesse per l'acquisizione in continuo dei parametri meteo-marini, su misure ad alta frequenza e lungo termine e trasmissione dati a terra in *real-time*.

I dati sono forniti ad un modello spettrale di moto ondoso per il trasferimento sottocosta e l'estrazione dei parametri di altezza significativa e periodo nella fascia di frangimento. I parametri sono utili al calcolo della sollecitazione puntuale esercitata dal moto ondoso sul tratto di costa studiato.

I parametri misurati sono:

- Altezza significativa spettrale del moto ondoso (misurata in m);
- Periodo di picco (misurato in sec);
- Periodo medio (misurato in sec);
- Direzione media di provenienza del moto ondoso (misurata in °N);
- Altezza pioggia (mm).
- Temperatura superficiale del mare (misurata in °C);
- Velocità corrente (m/s);
- Direzione corrente (°N);
- Direzione vento (°N);
- Velocità del vento (m/s),
- Pressione atmosferica (hPa);
- Umidità relativa (%);

2.5 Monitoraggio climatico

Questo paragrafo fa riferimento alla necessità di prevedere nel tempo possibili scenari di rischio direttamente dipendenti da eventi meteorologici, ordinari e estremi, caratterizzati da valori pluviometrici al di sopra della media (alluvioni e precipitazioni cumulate continue).

Il monitoraggio delle condizioni meteorologiche è fondamentale per correlare il superamento delle soglie pluviometriche con l'innescò di fenomeni di instabilità locale. I parametri meteorologici influenzano direttamente anche i processi di alterazione legati agli agenti atmosferici, di conseguenza risulta molto utile monitorare tutti quei parametri che possono influenzare sia direttamente che indirettamente le condizioni di stabilità di un'area.

I parametri meteorologici principali sono: precipitazioni (quantità, intensità oraria, distribuzione cumulativa nel tempo), temperatura, umidità (dell'aria e del suolo), vento (direzione, velocità), radiazione solare, evapotraspirazione, ecc.

Le misure saranno pertanto eseguite direttamente tramite stazioni meteorologiche in sito o presenti nelle immediate vicinanze, equipaggiate con dei datalogger che consentano la registrazione continua di tutti i parametri necessari.

I dati meteorologici raccolti, insieme alle serie storiche, saranno utili anche per determinare gli indicatori di pericolosità pluviometrica per ogni area di studio. Le soglie pluviometriche indicando una certa corrispondenza tra il tempo di ritorno della precipitazioni con quelle precedenti critiche e quelle precedenti non critiche, per i livelli di criticità moderata ed elevata (durate 1, 3, 6, 12, 24 ore e per diversi tempi di ritorno sia a livello puntuale che a livello areali).

3. Spiagge

Contributo tecnico del Partner UNIGE

1. Generalità

In riferimento al report T1.1, redatto durante la fase precedente, è emerso un quadro variegato sull'approccio e sulle metodologie per lo studio delle coste basse. Le prime disomogeneità fanno riferimento agli Enti preposti per le attività di analisi e monitoraggio; in seconda battuta la cadenza temporale dello svolgimento di tali attività, dove, solo in alcuni casi risulta essere sistematica, mentre la maggior parte dei dati raccolti fanno riferimento allo studio di settori puntuali ed a scala ridotta.

Lo studio dei fenomeni erosivi e delle dinamiche dei litorali delle coste basse si sviluppa attraverso l'individuazione della morfologia caratterizzante, ossia il riconoscimento delle principali forme che costituiscono la spiaggia; questo elemento è strettamente correlato alla morfologia, alla sedimentologia e all'idrodinamismo. Un altro fattore che assume un ruolo fondamentale è, senza alcun dubbio, l'impatto antropico; questo elemento determina, in molti casi, una modifica sostanziale dei processi naturali che caratterizzano la spiaggia.

Il monitoraggio di questi elementi deve essere condotto mediante metodi diretti (rilievi sul campo, analisi di laboratorio, video monitoraggio) e/o metodi indiretti (analisi statistica, modellistica costiera, modelli analitici). Queste due metodologie possono essere utilizzate a seconda delle criticità evidenziate nell'area studio preposte. Inoltre devono essere analizzate le condizioni logistiche per una corretta attuazione del protocollo di monitoraggio.

Alla luce di quanto emerso, risulta evidente l'utilizzo di una metodologia comune e produttiva capace di fornire le informazioni del tratto di costa in esame, evidenziandone, le tendenze evolutive, le principali forme, le caratteristiche idrodinamiche e gli effetti delle eventuali strutture antropiche.

Questo approccio, data la complessità evidente, richiede l'utilizzo di parametri e metodologie applicabili da tutti i Partner. Nei paragrafi successivi sarà esposta una schematizzazione di questa proposta, considerando le caratteristiche morfologiche ed idrodinamiche dei tratti di costa bassa delle rispettive regioni, non tralasciando le Linee Guida Nazionali, per le Regioni italiane, e le Linee guida redatte dal BRGM e da CEREMA, per le Regioni francesi.

2. Parametri per il Monitoraggio delle coste basse

2.1 Definizione degli obiettivi

I principali obiettivi che si pone questa attività sono identificabili in:

- determinazione della tendenza evolutiva del litorale;
- definizione dell'assetto dinamico sedimentario del litorale;
- valutazione del bilancio sedimentario;
- valutazione dell'efficacia delle opere di difesa e del loro impatto.

Questi studi dovranno essere condotti in sinergia con le altre attività del progetto, in particolare con "Clima meteomarinò" e "coste alte rocciose".

Inoltre parte delle indagini svolte saranno utilizzate per gli studi relativi ad altre attività del progetto, quali "Clima meteomarinò", "Biocenosi marine" e "Rischio costiero".

Il seguente schema mostra appunto le interazioni con le differenti attività.

Azioni	Dati richiesti	Dati forniti
T2.1 "Clima meteomarinò"	<ul style="list-style-type: none"> - serie storiche di moto ondoso (spettri e parametri di onda integrati), da utilizzare per modelli di trasporto solido litoraneo; - runup di onda; - stima di Sea Level Rise. 	- Rilievi batimetrici per la costruzione dei piani d'onda e delle correnti indotte dal moto ondoso sottocosta.
T2.3 "Coste Alte "	- Input sedimentario da erosione della falesia;	
T2.4 "Habitat ed ecosistemi marini e costieri"	- Distribuzione delle biocenosi costiere per la corretta pianificazione degli interventi;	- Rilievi batimetrici ed informazioni sull'idrodinamismo litorale per la costruzione di modelli previsionali sulla distribuzione delle biocenosi costiere.
T2.5 "Gestione rischio costiero"		<ul style="list-style-type: none"> - Rilievi batimetrici della spiaggia sommersa e rilievi topografici della spiaggia emersa per la valutazione del run up; - dati tessiturali dei sedimenti per la calibrazione dei modelli idrodinamici; - previsione e determinazione di correnti litoranee e rip currents.

2.2 Tipologia di dati per il monitoraggio del bilancio sedimentario: ricerca bibliografica, indagini di terreno, modelli

Gli studi relativi alla dinamica sedimentaria dei litorali sono generalmente svolti attraverso quattro distinte fasi:

- estensione del monitoraggio
- indagine storica;
- attività di campo;
- elaborazione dati ed implementazione di modelli matematici.

Estensione del monitoraggio

Estensione areale

Il litorale è un sistema dinamico alla continua ricerca di un equilibrio stabile in relazione alle condizioni al contorno contingenti. Variazioni di queste condizioni iniziali determinano quindi modificazioni dell'assetto costiero, non solo nel settore oggetto del cambiamento, ma anche nei settori adiacenti, purché questi abbiano scambi sedimentari con esso. L'indagine dovrà quindi interessare tutta l' "Unità fisiografica", cioè quel settore di costa dove i processi dinamico sedimentari non sono influenzati dai settori adiacenti. In alcuni casi, l'area d'indagine potrà essere ridotta ad un più limitato tratto costiero, se si ritiene scarsamente significativa l'influenza degli adiacenti paraggi.

Estensione temporale

L'estensione temporale delle indagini dovrà essere pianificata in funzione dell'obiettivo che s'intende raggiungere. Nel caso s'intenda effettuare uno studio di base rivolto alla comprensione dei meccanismi che governano il tratto di litorale indagato, si può ipotizzare di effettuare una sola campagna d'indagine. Nel caso si voglia effettuare un monitoraggio, ad esempio per valutare gli effetti di un intervento costiero o controllare lo stato di un litorale, si dovrà procedere con una serie di campagne ripetute secondo un cronoprogramma prestabilito. In funzione dell'obiettivo prefissato, gli studi, che successivamente saranno descritti potranno essere svolti ripetutamente o tralasciati in quanto non significativi per la corretta valutazione dei fenomeni.

Indagine storica

Costituisce la base iniziale su cui sviluppare tutte le successive elaborazioni per la definizione della tendenza evolutiva, dell'assetto dinamico sedimentario e poter giungere finalmente al bilancio sedimentario del litorale.

I dati che devono essere raccolti sono essenzialmente di carattere morfo – sedimentologico, ma non devono essere trascurate altre informazioni relative a trasformazioni intervenute sul waterfront indagato, quali ad esempio occupazione della spiaggia, opere di difesa ed altre modificazioni naturali o antropiche. L'estensione temporale dell'indagine dovrà essere a scala storica, la più ampia possibile in funzione della disponibilità delle notizie. Particolare attenzione dovrà essere posta alla qualità del dato e valutare ove possibile l'errore di misura presente.

Nella tabella seguente sono riportate le informazioni maggiormente utili alla ricostruzione storica dell'evoluzione del litorale.

Dato	Informazioni richieste	Altro
Linea di riva	- anno del rilievo; - modalità di esecuzione (foto aeree, satellitari; mappe storiche ecc.).	- Precisione della misura

Rilievi pianoaltimetrici (Batimetria e topografia spiaggia emersa)	- anno del rilievo; - modalità di esecuzione.	- Precisione della misura
Opere di difesa	- anno di costruzione; - modalità di costruzione; - varianti successive.	- modifiche e/o manutenzioni
Altre strutture	- anno di costruzione; - modalità di costruzione; - varianti successive.	- modifiche e/o manutenzioni
Ripascimenti (e successive ricariche)	- anno dell'intervento - volumi immessi	- caratteristiche tessiturali - modalità di versamento

Attività di campo

Le attività di terreno nello studio dei litorali sono essenzialmente indirizzate alla caratterizzazione morfologica e sedimentologica della spiaggia emersa e sommersa. Questa distinzione si rende necessaria in quanto le tecniche d'indagine per i due settori sono differenti.

Le indagini sulla spiaggia emersa sono rivolte alla determinazione topografica della superficie ed alla identificazione, ove presenti, delle principali strutture morfosedimentologiche (piede della duna, berma di tempesta, berma ordinaria, ecc.). In passato questa indagine veniva effettuata mediante profili altimetrici a differente spaziatura a partire da caposalda fissi georiferiti. Le attuali tecniche topografiche (laser scanner, Dgps, remote sensing) hanno ormai superato, in accuratezza e velocità d'esecuzione queste, modalità di misura e pertanto sono preferibili, almeno in morfologie irregolari. Le misure relative alle strutture morfosedimentologiche della spiaggia emersa, hanno un utilizzo limitato nelle attività di pianificazione, ma rivestono ancora una notevole importanza per la comprensione dei meccanismi dinamico sedimentari e per la taratura dei modelli matematici morfo – idrodinamici.

Analogamente a quanto riportato per la spiaggia emersa, anche il rilievo batimetrico è sovente realizzato mediante profili batimetrici posizionati in coincidenza con i capisaldi georiferiti precedentemente citati. Questa metodologia ovviamente presenta evidenti limiti, specie in presenza di litorali costituiti da morfologie sottomarine irregolari, e non permette una corretta valutazione areale dell'evoluzione dei fondali. Le attuali tecniche d'indagine, che utilizzano la tecnologia multibeam, sono sicuramente preferibili alla tecnica singlebeam, e sono da considerarsi essenziali specialmente nelle attività di monitoraggio per la valutazione dell'efficacia degli interventi di difesa costiera. Inoltre questa tecnica, fornendo una maglia di punti più densa, permette di determinare accuratamente le loro variazioni e conseguentemente le differenze volumetriche che hanno interessato il fondale. Quest'ultimo è un parametro fondamentale per la corretta determinazione del bilancio sedimentario.

La linea di riva costituisce il parametro più utilizzato nella valutazione della tendenza evolutiva del litorale. Sicuramente questo parametro risulta essere molto utile nelle analisi a lungo termine, mentre è scarsamente significativo nelle valutazioni a breve termine, in quanto influenzato dalle condizioni meteomarine contingenti. Le modalità di determinazione della linea di riva a lungo termine sono già state descritte nel paragrafo “*indagine storica*”. Quando si opera in spiagge di modesta estensione, o si ha la necessità di monitorare tratti limitati di litorale, in sostituzione al rilevamento topografico, è preferibile l’utilizzo di sistemi di monitoraggio quali web – cam che, registrando lo stato della spiaggia in continuo, forniscono informazioni di maggior dettaglio e soprattutto correlabili con lo stato del mare.

Le indagini sedimentologiche sono effettuate sia sulla spiaggia emersa che sommersa. Queste devono prevedere il prelievo di campioni di sedimento in punti significativi del litorale. Nella spiaggia emersa i punti di campionamento sono individuabili nella battigia ed in corrispondenza delle strutture sedimentarie (berme); in assenza di queste, possono essere previsti campionamenti nella porzione mediana e in quella superiore della spiaggia. Il piano di campionamento della spiaggia sommersa è preferibile effettuarlo successivamente al rilievo batimetrico in modo da poter posizionare correttamente i punti di prelievo e quindi evitare campioni scarsamente significativi. Anche in questo caso sono privilegiate le strutture sedimentarie quali le barre o la zona di rottura dell’onda. I campioni, ove possibile, devono essere disposti lungo profili perpendicolari alla linea di riva. La posizione dei transetti deve tenere conto di eventuali settori significativi del litorale sia naturali (cuspidi falcatore) sia antropiche (opere di difesa).

Le analisi che devono essere effettuate sui campioni prelevati sono principalmente indirizzate alla caratterizzazione tessiturale dei sedimenti. Le analisi granulometriche sono effettuate utilizzando la scala di Wenworth ad $\frac{1}{2} \phi$. Oltre alla classificazione granulometrica con scala verbale, è opportuno definire i principali indici tessiturali: i parametri della tendenza centrale (moda, media e mediana), la classazione e l’asimmetria. Queste misure hanno interesse soprattutto nella comprensione dei meccanismi dinamico-sedimentari che governano il litorale e nella progettazione degli interventi di ripascimento. Altre analisi non strettamente necessarie, ma comunque consigliabili, sono quelle composizionali e colorimetriche. Le prime sono rivolte alla caratterizzazione minero-petrografica dei sedimenti costituenti la spiaggia per una definizione delle fonti di alimentazione e dei flussi sedimentari, le seconde a definirne quantitativamente il colore. Entrambe sono utili nella scelta del materiale più idoneo negli interventi di ripascimento, in particolare in situazioni di elevato pregio naturalistico.

Elaborazione dati ed implementazione di modelli matematici.

I dati ricavati dalle attività precedenti sono elaborati allo scopo di desumere tutte le informazioni necessarie alla corretta pianificazione e gestione del sistema spiaggia. Per lo sviluppo corretto di queste elaborazioni sono necessari anche le indagini provenienti dalle altre attività. In questa fase devono essere quindi perseguiti gli obiettivi precedentemente enunciati:

- determinazione della tendenza evolutiva del litorale;

- definizione dell'assetto dinamico sedimentario del litorale;
- valutazione del bilancio sedimentario.

Il confronto delle linee di riva costituisce sicuramente il primo parametro da analizzare. Esso ci fornisce una stima sullo stato del sistema e delle sue tendenze evolutive. Nel caso di variazioni contenute o di confronti ravvicinati, questo parametro può risultare poco significativo; quindi è opportuno valutarlo congiuntamente ad altri parametri, quali ad esempio le variazioni dei fondali. Questo secondo parametro è fondamentale nelle attività di monitoraggio e nella determinazione del bilancio sedimentario. Negli studi di base una corretta interpretazione delle modifiche occorse al litorale può essere molto importante, non solo per la ricostruzione evolutiva, ma anche per ricavare utili informazioni sull'assetto dinamico sedimentario del settore costiero. Finalmente lo studio deve fornire tutte le informazioni necessarie alla comprensione dei meccanismi che hanno determinato l'attuale assetto costiero, individuare le cause che hanno provocato le fasi di erosione e/o progradazione della spiaggia ed in ultimo valutare la tendenza evolutiva a cui è soggetto il litorale.

La determinazione dell'assetto dinamico sedimentario non può prescindere dalle informazioni desunte dall'attività relativa allo studio del "clima meteomarinò". La corretta conoscenza del moto ondoso interessante il settore indagato costituisce, non solo il punto di partenza per lo studio della deriva litoranea, ma è il requisito fondamentale anche per tutte le successive modellazioni che devono essere eseguite soprattutto negli studi di base. Attraverso l'utilizzo di modelli matematici devono essere definiti e quantificati tutti i parametri utili alla comprensione dell'assetto dinamico sedimentario. La descrizione quali-quantitativa del moto ondoso sottocosta e delle correnti da esso indotte deve essere finalizzata alla determinazione delle direzioni di trasporto, delle traiettorie delle correnti litoranee, della capacità penetrativa del moto ondoso sulla spiaggia (run up) e della definizione della profondità di chiusura. Si devono prevedere differenti scenari con agitazioni ondose di differente intensità, ad esempio con tempi di ritorno a 1, 10 e 50 anni, e direzione di provenienza differenti, in relazione ai settori di traversia principale e secondario. Altri studi rivolti alla comprensione della dinamica sedimentaria sono quelli relativi alle indagini sedimentologiche. La realizzazione di carte tematiche dei vari parametri tessiturali fornisce informazioni utili alla comprensione dei meccanismi dinamico sedimentari. Il confronto fra i vari parametri, ad esempio utilizzando la metodologia proposta da Gao e Collins¹, permette di determinare le principali direzioni di trasporto. Anche un'approfondita analisi della morfologia della spiaggia, emersa e sommersa, aiuta a comprendere la dinamica del litorale ed inoltre fornisce dati utili alla taratura dei modelli matematici. In particolare questa tipologia di analisi è fondamentale nelle attività di valutazione degli interventi di difesa, allo scopo di verificare la bontà delle scelte progettuali specie se individuate sulla base dei risultati dei modelli matematici.

¹ Gao S., Collins M. (1992) – Net sediment transport patterns inferred from grain size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary Geology*, 81, 47 -60.

Lo stato di salute di un litorale è diretta conseguenza del suo bilancio sedimentario. Quindi è essenziale riuscire a valutare in modo più preciso possibile questo parametro. Il bilancio sedimentario è dato dagli input, cioè i sedimenti immessi nel sistema (apporti dei corsi d'acqua, detritazione delle falesie, apporti artificiali), e dagli output, cioè i sedimenti allontanati dal sistema, quindi teoricamente all'interno di una unità fisiografica le perdite di sedimento dovrebbero essere dovute alla sola usura dei sedimenti ed alla loro conseguente dispersione al largo. Però all'interno della stessa unità fisiografica si possono creare, a causa di modificazioni dell'assetto costiero, delle variazioni tali da creare disequilibri rispetto alla situazione iniziale. Pertanto un attendibile calcolo del bilancio sedimentario dovrebbe essere applicato inizialmente a livello di unità fisiografica e solo successivamente estrapolato a scala inferiore. La modalità più semplice di calcolo è la messa a confronto delle levate topo – batimetriche del litorale. La differenza volumetrica costituisce appunto il bilancio sedimentario della spiaggia. Individuare però con esattezza questo parametro è operazione molto complessa e di difficile realizzazione. Nonostante le attuali tecniche di misura abbiano ormai raggiunto un'elevata precisione, l'errore comunque presente può causare differenze volumetriche molto importanti. Ad esempio in una spiaggia con pendenza pari al 3% e profondità di chiusura posta a 6 metri, il solo errore strumentale pari a circa 1 cm, causa una differenza volumetrica di 2 m^3 per metro lineare di spiaggia. La sola differenza volumetrica non è però dato sufficiente a comprendere il bilancio sedimentario, o meglio ad individuare il valore degli output e degli input sedimentari. Per quanto riguarda la valutazione del deficit sedimentario, questi studi devono essere supportati ovviamente dalle informazioni desunte dall'idrodinamica e dalla analisi sedimentaria, valutando le perdite di sedimento causate dalla deriva litoranea soprattutto di tipo cross – shore (rip currents) che sono in grado di disperdere al largo, oltre la profondità di chiusura, i sedimenti, sottraendoli al sistema litorale. Aspetti questi difficilmente stimabili quantitativamente. Infine gli input sedimentari, che come detto precedentemente sono individuabili negli apporti dei corsi d'acqua e dalla detritazione delle falesie, il cui calcolo dei quantitativi immessi non è immune da errori non solo di misura ma anche in considerazione della variabilità temporale a cui sono soggetti questi fenomeni. Quindi giungere ad una misura esatta del bilancio sedimentario è estremamente difficile, e talvolta è più opportuno porsi come obiettivo una sua valutazione semi-quantitativa.

2.3 Ulteriori considerazioni

La metodologia proposta contempla tutti gli studi e le indagini che si ritiene opportuno svolgere per una completa attività di monitoraggio delle coste deposte. Ovviamente essa dovrà però essere adattata alle esigenze contingenti ed all'obiettivo che s'intende perseguire. Quindi le attività precedentemente descritte potranno essere svolte totalmente o solo in parte. A tale riguardo è opportuno introdurre una distinzione di fondo relativa alle indagini che si svolgono sul litorale. Come accennato già precedentemente si possono distinguere due differenti tipologie di studi riguardanti le attività di controllo dei litorali:

- gli studi di base del litorale;
- il monitoraggio del litorale.

Gli studi di base sono svolti essenzialmente per comprendere i meccanismi che governano il sistema litorale. Essi costituiscono le fondamenta per qualsiasi successiva azione pianificatoria e/o gestionale che sarà intrapresa sul tratto di costa. Pertanto l'indagine dovrà essere svolta a livello di unità fisiografica ma ad una scala di dettaglio (1:5.000 – 1:10.000). Le indagini riguarderanno tutti i punti precedentemente trattati e dovranno fornire un quadro completo dell'assetto litorale. Per quanto riguarda le indagini di campagna queste non dovranno essere ripetute se non per approfondire certi particolari aspetti emersi durante le indagini. Può essere utile effettuare controlli in continuo, ad esempio mediante l'utilizzo di web – cam dedicate, sia per studiare le variazioni stagionali, sia per ricavare informazioni utili alla taratura dei modelli matematici che in queste indagini costituiscono uno dei passaggi fondamentali per le successive attività di governance.

Il monitoraggio del litorale, inteso come controllo dell'evoluzione del sistema protratto nel tempo, è una pratica utilizzata nei casi in cui si voglia valutare gli effetti di interventi sulla costa o più semplicemente tenere sotto osservazione un tratto di costa. L'estensione dell'indagine in questo caso può essere limitata al settore d'indagine o all'area d'influenza delle eventuali opere realizzate. Le indagini saranno svolte ad una scala di dettaglio 1:5.000 od inferiore. In coincidenza di strutture il rilievo dovrà avere un'accuratezza superiore, anche 1:1.000. In questi studi le attività si riducono essenzialmente alle indagini di campo ripetute secondo una periodicità prestabilita ed il successivo confronto tra le diverse campagne. Mentre le indagini da eseguire sono facilmente standardizzabili e coincidono con quelle descritte precedentemente, più complessa è la messa a punto del cronoprogramma delle attività. Generalmente il monitoraggio ha una durata di almeno 5 anni ed una frequenza temporale biennale (i.e. 1, 3, 5 anni) per le indagini topo – batimetriche e sedimentologiche, ma in alcuni casi, per comprendere meglio le condizioni della spiaggia nei suoi assetti di alta e bassa energia, si può procedere con una cadenza stagionale. Per quanto riguarda il monitoraggio della linea di riva la frequenza dei rilievi può essere annuale ed è effettuata con tecniche topografiche. Però, poiché questo parametro ha una forte variabilità intrinseca, può talvolta risultare poco significativo, in particolare quando si eseguono rilievi ravvicinati nel tempo, ad eccezione dei casi in cui siamo in presenza di intensi fenomeni di erosione o progradazione. In presenza di un'area d'indagine di estensione limitata è preferibile l'utilizzo di sistemi di monitoraggio in continuo quali le web–cam che, come detto precedentemente, oltre a fornire informazioni sulle variazioni di breve termine, permettono di correlare più correttamente gli spostamenti della linea di riva con gli eventi meteomarini che li hanno determinati.

Sulla base di quest'ultime considerazioni si ritiene, e pertanto si propone, che nella realizzazione dei piani di monitoraggio, relativi all'attività T2.2, si tenga conto di queste due differenti tipologie e si realizzino due piani distinti con attività specifiche per ognuno di essi.

4. Bacini idrografici

Contributo tecnico del Partner *Arpas*

1. Premessa, Introduzione e Considerazioni generali

L'analisi sviluppata nell'ambito dell'attività T1.2 e sintetizzata nel Report T.1.1. "Analisi critica dei sistemi di monitoraggio e della tipologia di dati monitorati con valutazione costi benefici delle metodologie utilizzate" in riferimento agli aspetti specifici "*bacini idrografici e trasporto solido fluviale alle foci*", ha messo in evidenza, per le ragioni già rappresentate, una carenza e una scarsa disponibilità di dati e informazioni relativa agli apporti sedimentari alle foci.

Come già evidenziato nel citato documento, i sistemi fluviali rappresentano la rete naturale principale attraverso la quale avviene il trasferimento dei sedimenti dalle zone di produzione sui versanti alle zone di deposito come le pianure alluvionali e, infine, foci e litorali. La quantità di sedimenti sabbiosi che viene rilasciata alla foce di un fiume è il risultato di complessi fenomeni naturali, geomorfologici, idrologici ed idraulici che continuamente interagiscono e che, a loro volta, sono influenzati direttamente o indirettamente dalle varie attività antropiche.

La comprensione di tali fenomeni è dunque requisito essenziale, oltre che per la prevenzione del dissesto idrogeologico, anche per qualunque attività di gestione dei litorali. Quest'ultimo obiettivo può esaustivamente essere perseguito solo attraverso un'adeguata conoscenza della quantità (e della qualità) e della distribuzione nello spazio e nel tempo dei bilanci sedimentari, quindi in primo luogo degli apporti dei corsi d'acqua. A tale scopo è necessario disporre di un quadro conoscitivo del sistema (bacino idrografico) e di strumenti di analisi e valutazione, diretta e indiretta, del trasporto solido fluviale.

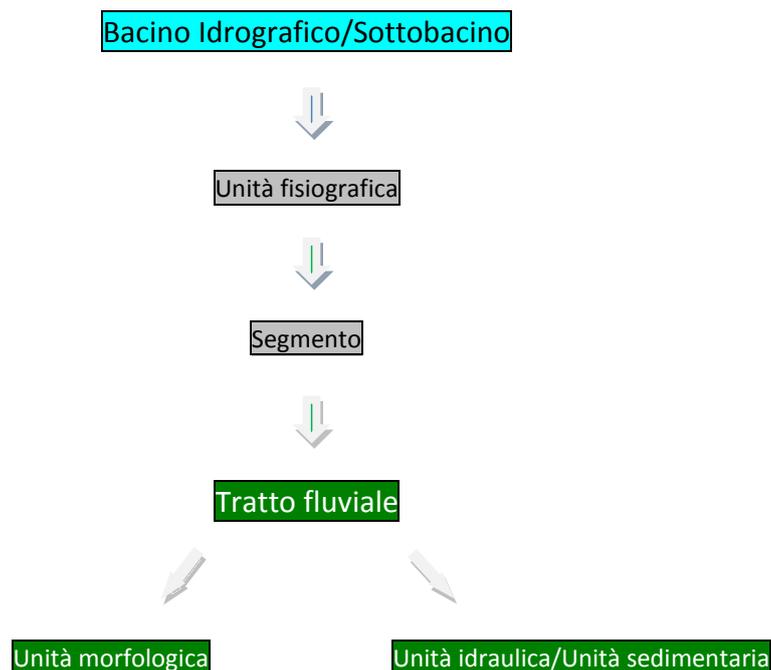
Si ritiene pertanto strategico, analogamente a quanto viene effettuato in riferimento al "trasporto solido litoraneo" nelle spiagge (emersa e sommersa), predisporre un protocollo metodologico comprendente indicatori e parametri comuni utili per la redazione di un "Piano di Monitoraggio dei principali elementi idromorfologici fluviali" che consenta di valutare le tendenze evolutive del corso d'acqua, di comprenderne le dinamiche morfologiche attraverso le quali pervenire alla definizione delle dinamiche di trasporto alla costa e della quantificazione dei sedimenti che vi giungono, quale input sedimentario verso le Unità fisiografiche/Celle sedimentarie costiere oggetto di prossimo studio.

Il primo passo metodologico consiste nella proposizione di un set di indicatori e di parametri utili per effettuare il monitoraggio morfo-sedimentologico del bacino idrografico con particolare riferimento ai processi e alle tendenze evolutive del corso d'acqua che alimenta il settore costiero che sottende il bacino.

2. I principali indicatori per il monitoraggio morfosedimentologico

2.1. Le scale spaziali e temporali

Il protocollo che si propone fa riferimento a scale spaziali e temporali descritte e schematizzate nel seguito; per quanto riguarda le scale spaziali di analisi, è adottato un approccio di suddivisione secondo il seguente schematico ordine gerarchico decrescente:



Lo schema prevede un'analisi a scala di "area vasta" (1:25.000/1:10.000) sul bacino/sottobacino e un'analisi a scala di dettaglio (non inferiore a 1:2.000) per le altre unità gerarchicamente sottostanti (Tratto, U.m., U.s, etc.).

Le scale temporali di analisi, in linea generale, comprenderanno:

Scala geologica ($10^4 \div 10^6$ anni), geologia e fisiografia del bacino ed evoluzione del reticolo idrografico nel lungo termine (ad es., catture fluviali, fenomeni di sovrimposizione).

Scala storica ($10^2 \div 10^3$ anni), morfologia dei corsi d'acqua in tempi storici, tipo di sistemazioni e altri tipi di controlli antropici a cui sono stati soggetti.

Media scala temporale (ultimi 100÷150 anni), la scala più importante per identificare e comprendere l'attuale forma dei corsi d'acqua, a seguito di variazioni morfologiche planimetriche (alveo ristretto o allargato) o altimetriche (alveo inciso o aggradato). È la scala di maggiore interesse per studi di carattere applicativo (denominata talora anche scala gestionale). Al suo interno si possono ulteriormente distinguere:

- Scala degli ultimi 10÷15 anni, che è la scala più adatta per definire le tendenze attuali (alveo in incisione, in sedimentazione o in equilibrio dinamico).
- Scala annuale/stagionale, che è una scala poco significativa per l'interpretazione delle forme e dei processi evolutivi ma, viceversa, può avere qualche effetto temporaneo sulle caratteristiche granulometriche e/o vegetazionali locali, in funzione degli eventi verificatisi durante l'ultimo ciclo stagionale.

2.2. Monitoraggio morfologico della rete idrografica, dell'alveo principale e del settore focivo

Successivamente all'analisi e alla caratterizzazione del sistema fluviale (Inquadramento e suddivisione del reticolo idrografico, caratterizzazione e valutazione delle condizioni attuali e passate del sistema fluviale; studio morfometrico secondo i più noti parametri morfometrici (cfr. Horton R.E., 1932; Horton R.E., 1945; Strahler A.N., 1952; Strahler A.N., 1964; Gupta et alii, 1980; Rodriguez-Iturbe I. & Escobar I.A., 1982; Gupta et alii, 1984), **si prevede** di valutare le tendenze future attraverso il monitoraggio morfologico della rete idrografica, dell'alveo principale e del settore focivo. Tale fase si applica alla scala di tratto scelto sulla base di criteri di rappresentatività o criticità. Gli indicatori che possono essere oggetto di monitoraggio sono complessivamente 31 di cui 17 riferibili al sistema naturale, 12 agli elementi del sistema artificiale e 2 classificati come "ulteriori elementi per il monitoraggio".

2.2.1 Monitoraggio degli elementi morfologici naturali

Relativamente agli aspetti morfologici naturali, gli indicatori e i parametri che possono essere utili per il loro monitoraggio sono schematizzati nella tabella sottostante che evidenzia la scala temporale di analisi

Elemento morfologico	Metodo di rilevamento/misura e relativa scala spaziale
<i>Indicatori e parametri planimetrici</i>	
1. Indice di sinuosità	Telerilevamento (tratto) - Misura terreno (solo sito)
2. Indice di intrecciamento	Telerilevamento (tratto) - Misura terreno (solo sito)
3. Indice di anabranching	Telerilevamento (tratto) - Misura terreno (solo sito)
4. Lunghezza sponde in arretramento e tassi di arretramento	Telerilevamento (tratto)
5. Ampiezza e continuità piana inondabile	Telerilevamento (tratto)
<i>Profilo longitudinale</i>	
6. Pendenza del fondo	Rilievo profilo di fondo, possibilmente esteso dal sito al tratto
7. Variazione di quota del fondo	Rilievo profilo di fondo esteso dal sito all'intero tratto
<i>Profilo trasversale</i>	
8. Larghezza alveo	Telerilevamento (tratto) - Rilievo sezioni (sito)
9. Profondità alveo	Rilievo sezioni: 2 o 3 sezioni nel sito (preferibilmente estremità monte, valle, centro)
10. Rapporto larghezza /profondità	Da valori misurati in base a rilievo sezioni (sito)
<i>Sedimenti del fondo</i>	
11. Dimensioni granulometriche sedimenti del fondo	Misura granulometrica (unità sedimentaria)
12. Struttura del fondo: grado di corazzamento e clogging	Valutazione qualitativa (sito), Misure granulometriche (unità sedimentaria) solo nei casi di corazzamento molto accentuato

<i>Materiale legnoso</i>	
13. Abbondanza di materiale legnoso di grandi dimensioni	Conteggio sul terreno (sito) Telerilevamento (sito)
<i>Vegetazione fascia perifluviale</i>	
14. Ampiezza delle formazioni funzionali presenti in fascia perifluviale	Telerilevamento (tratto)
15. Estensione lineare delle formazioni funzionali presenti in fascia perifluviale	Telerilevamento (tratto)
<i>Indici rilevamento Unità Morfologiche</i>	
16. Indici S.U.M.	Rilievo sul terreno e/o telerilevamento (sottotratto)
<i>Parametri idrologici</i>	
17. Portate liquide	Misure idrometriche in corrispondenza di stazioni di misura esistenti (in continuo)

2.2.2 Monitoraggio degli elementi artificiali

Nel seguito si riporta l'elenco delle opere possibili che hanno interesse per il monitoraggio morfologico la cui scala temporale di analisi è quinquennale/stagionale/scala di evento:

- dighe
- altre opere di alterazione delle portate liquide e/o solide (canali diversivi e scolmatori, derivazioni, traverse, sifoni, chiaviche, casse di espansione, desabbiatori, etc.);
- opere trasversali di regolazione (briglie; pennelli imbonitori etc.) e longitudinali di difesa spondale (rivestimenti in cemento, massi, gabbioni, materassi, etc.)
- opere di attraversamento;
- tombamenti;
- argini;
- sovrалzi arginali;
- variazioni di tracciato o modifiche di forme fluviali nella pianura (inalveamenti, rettifiche, etc.)
- variazioni areali della fascia erodibile;
- rivestimenti del fondo;
- Interventi di gestione e rimozione dei sedimenti e/o ricalibratura dell'alveo;
- Interventi di rimozione del materiale legnoso in alveo;
- taglio di vegetazione nella fascia perifluviale;

2.2.3 Altri elementi per l'analisi ed il monitoraggio: le portate solide e l'uso del suolo

Le portate solide

Le portate solide possono essere misurate o stimate con metodi diretti o indiretti:

- con metodi diretti in corrispondenza di tratti e sezioni significative e misurata in un intervallo di tempo predefinito; (metodi strumentali e/o geomorfologici)
- con metodi indiretti e con l’ausilio della modellistica si ottengono stime della capacità di trasporto solido; in questo caso gli indicatori principali e necessari per la costruzione dei modelli sono:
 - indici morfometrici fluviali (lunghezza, pendenze, altimetrie, scabrezza, indice o densità di gerarchizzazione; cfr. Strahler, Horton, etc.)
 - indici idrologici e idraulici;
 - indici termo pluviometrici;
 - indici geolitologici;
 - indici di erosione.

L’uso del suolo

Un altro indicatore fondamentale da monitorare è rappresentato dall’uso del suolo, soprattutto quando si opera a scala di bacino, dato che le sue variazioni hanno effetti importanti sia sulle portate solide che sulle portate liquide (ovviamente al netto di eventuali recenti introduzioni di norme tendenti al rispetto del principio dell’invarianza idraulica); per questo aspetto sarebbero da prevedere rilievi periodici almeno quinquennali soprattutto nei territori più sensibili e maggiormente soggetti a sviluppo antropico e a frequenti cambiamenti d’uso.

5. Habitat marino-costieri

Contributo tecnico del Partner *Arpas*

1. Premessa e considerazioni generali

La determinazione delle condizioni degli habitat marini deve avere le seguenti finalità:

- aumentare le conoscenze ambientali sugli habitat per tutte le finalità di pianificazione costiera;
- condizionare la progettazione degli interventi costieri, nell'ottica di contribuire alla individuazione di soluzioni progettuali ottimali sia sotto il profilo dell'efficacia, sia sotto il profilo ambientale;
- fornire elementi adeguati alle istruttorie delle fasi di approvazione degli interventi;
- verificare le previsioni della suddetta fase.

1.1. Habitat da prendere in considerazione

Le opere di difesa costiera prese in considerazione dal progetto Maregot riguardano in genere una stretta fascia costiera che si sviluppa dalla linea di costa alla profondità di chiusura della dinamica litoranea dei sedimenti.

Per questo motivo, anche a livello naturalistico, gli habitat marini che interagiscono e possono essere influenzati da questo tipo di gestione del territorio sono quelli più tipicamente costieri.

Indicativamente la fascia marina da prendere in considerazione ha come limite superiore la chiusura, a terra, della fascia dinamica della spiaggia e come limite inferiore il limite inferiore della prateria di *Posidonia oceanica*.

In generale, un efficace indicatore ambientali deve avere le seguenti caratteristiche:

- valore intrinseco in termini di biodiversità e valenza ecologica;
- sensibilità, cioè modificabilità, rispetto agli interventi considerati: se la modifica corrisponde ad un peggioramento (diminuzione della superficie e/o dello stato di conservazione) e i tempi di ripristino naturale sono lunghi siamo in presenza di elementi sensibili e vulnerabili.

Nella fascia litoranea presa in considerazione, e riferendosi al contesto ligure, rispondono a tali caratteristiche due situazioni naturalistiche:

- le praterie di *Posidonia oceanica*;
- gli habitat marini associati alla costa alta o rocciosa (parte immersa delle scogliere e delle falesie): è da sottolineare che dal punto di vista della bionomia marina non si tratta di un unico habitat ma di un vario sistema di habitat la cui complessità impone un approccio basato su indicatori di sintesi.

1.2. Scala spaziale

La scala spaziale alla quale occorre analizzare gli habitat è quella del *paraggio costiero*, come definito dalla normativa regionale ligure, che si riporta di seguito:

L'unità fisiografica è l'area litorale all'interno della quale i sedimenti di spiaggia (emersa e sommersa) sono confinati e non vi sono interscambi di materiale con le unità fisiografiche limitrofe. I limiti delle unità fisiografiche sono costituiti dalle strutture naturali (promontori, canyon) o artificiali (pennelli, porti, ecc.) che raggiungono profondità paragonabili alla profondità di chiusura della spiaggia ovvero che invertono il senso della deriva sedimentaria, costituendo un punto di divergenza della deriva dei sedimenti lungo la costa.

All'interno di un'unità fisiografica si possono distinguere settori di costa, definiti paraqqi costieri, che possono essere considerati indipendenti per mareggiate ordinarie, ovvero con tempi di ritorno dell'ordine di 1 anno.

Un paraggio costiero può a sua volta essere suddiviso, in genere da strutture artificiali, in celle.

2. Monitoraggio

Per entrambi i target ambientali sopra individuati è necessario procedere a due diverse fasi di studio e caratterizzazione:

- Inquadramento di base: si tratta delle condizioni dell'habitat alla scala di paraggio, da definire indipendentemente da una eventuale progettualità e prima di ogni intervento; in Liguria tale attività viene fornita dalla Regione.
- Monitoraggio specifico: è un monitoraggio che può essere realizzato ad una scala di maggiore dettaglio e su aree di minore estensione; è correlato alla fase di progettazione e monitoraggio di singoli interventi costieri; questa attività, a carico dei soggetti proponenti, viene pianificata sulla base del quadro conoscitivo messo a disposizione dall'inquadramento di base.

2.1. Inquadramento di base per gli habitat della costa alta o rocciosa

Il prodotto di tale inquadramento di base è una cartografia in formato GIS vettoriale (scala 1:10.000 o maggiore dettaglio) del substrato roccioso presente nella fascia dinamica della costa, realizzata mediante interpretazione di:

- modelli digitali del fondale con risoluzione non superiore a 1 metro;
- sonogrammi georiferiti da side scan sonar con risoluzione non superiore a 1 metro;
- repertorio aerofotogrammetrico (immagini zenitali e prospettiche);
- campagne di verità mare su transetti o punti georiferiti mediante telecamera, ROV o rilievi di operatori.

La cartografia deve poter distinguere almeno le seguenti classi tipologiche: costa naturale, costa artificiale (opere di difesa costiera).

Per la caratterizzazione qualitativa dell'habitat viene utilizzato l'indice CARLIT applicato al piano intertidale, alla scala spaziale di singolo settore (tratto di costa di 50 metri lineari) e alla scala temporale triennale.

2.2. Inquadramento di base per le Praterie di *Posidonia oceanica*

Il prodotto di tale inquadramento di base è una cartografia in formato GIS vettoriale (scala 1:10.000 o maggiore dettaglio) delle praterie di *Posidonia oceanica*: realizzata mediante interpretazione di:

- modelli digitali del fondale con risoluzione non superiore a 1 metro;
- sonogrammi georiferiti da side scan sonar con risoluzione non superiore a 1 metro;
- repertorio aerofotogrammetrico ortorettificato;
- campagne di verità mare su transetti o punti georiferiti mediante telecamera, ROV o rilievi di operatori.

La cartografia deve poter distinguere almeno le seguenti classi tipologiche: prateria continua, prateria a chiazze, matte morta, prateria su roccia.

Per la caratterizzazione qualitativa dell'habitat viene utilizzato:

- l'indice PREI, alla scala spaziale di paraggio e alla scala temporale triennale.
- La profondità e tipologia del limite inferiore, alla scala spaziale di paraggio e alla scala temporale triennale.
- la trasparenza delle acque (misure bimestrali con disco di Secchi), alla scala spaziale di paraggio.

3. Monitoraggio specifico per gli habitat della costa alta o rocciosa

Il prodotto di tale monitoraggio è la verifica, precisazione e aggiornamento dell'inquadramento di base nelle aree di influenza di specifiche opere costiere.

Le tecniche di acquisizione dei dati sono principalmente quelle delle campagne di verità previste per l'inquadramento di base, con un raffittimento spaziale dello sforzo di campionamento.

Per particolari tipi di habitat, quali ad esempio beach-rock o grotte marine, ove il protocollo CARLIT non fornisce sufficienti informazioni, possono essere previste attività di monitoraggio integrative quali:

- conteggi o censimenti su aree o transetti delle specie bentoniche cospicue
- censimenti visuali della fauna ittica.

La frequenza temporale prevede generalmente un momento zero (ante operam), un momento a fine lavori ed una o più campagne post-operam, in base alla natura dell'intervento ed ai risultati conseguiti.

4. Monitoraggio specifico per le Praterie di *Posidonia oceanica*

Il prodotto di tale monitoraggio è la verifica, precisazione e aggiornamento dell'inquadramento di base nelle aree di influenza di specifiche opere costiere.

Le tecniche di acquisizione dei dati sono principalmente quelle delle campagne di verità previste per l'inquadramento di base, con un raffittimento spaziale dello sforzo di campionamento.

In casi di particolare rilevanza possono essere previste attività di monitoraggio integrative quali

- “balisage” (marcatura) del limite superiore e inferiore delle praterie di *Posidonia oceanica*;
- analisi fenologica sulle foglie di *Posidonia oceanica*;
- censimenti visuali della fauna ittica.

La frequenza temporale prevede generalmente un momento zero (ante operam), un momento a fine lavori ed una o più campagne post-operam, in base alla natura dell'intervento ed ai risultati conseguiti.

