

PROGETTO MAREGOT

Management dei Rischi derivanti dall'Erosione Costiera e Azioni di Governance Transfrontaliera

T2.1.1 Proposta metodologica per lo strumento operativo di previsione e gestione del rischio costiero a breve termine con riferimento a mareggiate ed eventi estremi. (Attività 2.1 della componente T2 « Stratégie transfrontalière pour le Plan d'Intervention »)

Responsabile attività 2.1: Consorzio LaMMA



Il presente rapporto tecnico è stato redatto da:

Carlo Brandini

Massimo Perna

Valentina Vannucchi

Giovanni Vitale

SOMMARIO

SOMMARIO.....	3
PREMESSA.....	4
I. OBIETTIVI DEGLI STUDI RELATIVI ALLA GESTIONE DEL RISCHIO	5
A. Rischio, pericolosità, vulnerabilità ed esposizione.....	5
B. Rischi per l'ambiente naturale e per quello costruito	6
C. Rischi per la vita umana.....	7
II. METODI, MODELLI E SISTEMI DI PREVISIONE DEL RISCHIO COSTIERO.....	9
A. Modelli di previsione meteomarina e idrodinamica da scala di bacino a scala costiera.....	9
B. Sistemi operativi di previsione meteomarina.....	10
C. Metodi e modelli per la previsione dell'impatto delle onde lungo la costa	12
D. Modelli idrodinamici a scala locale per la previsione dei rischi.....	12
E. Contributo della modellistica meteo-oceanografica alla previsione del rischio di inondazione ..	13
F. INDICI PER LA STIMA DEL RISCHIO COSTIERO	14
G. Progetti riguardanti la valutazione del rischio costiero	16
III. CONTENUTI DELLA RELAZIONE TECNICA SUL RISCHIO A BREVE TERMINE	18
A. Caratteristiche geomorfologiche e sedimentologiche	18
B. Caratteristiche di moto ondoso e idrodinamiche	18
C. Esempio sito pilota tra Bocca di Magra e Marina di Massa	22
IV. CONTENUTI TECNICI DEI SISTEMI DI PREVISIONE E ALLERTAMENTO.....	25
A. Utilizzo dei dati previsionali a larga scala	25
B. Sistemi previsionali a scala locale	28
C. Confronto osservazioni/modelli e stima dell'incertezza	31
V. SINTESI DELLA PROPOSTA METODOLOGICA	32
BIBLIOGRAFIA.....	33

PREMESSA

L'obiettivo di questo rapporto non è quello di fornire una trattazione completa di tutti i potenziali rischi che possono incidere sulle aree costiere, ma prevalentemente di quelli derivanti dallo stato fisico del mare (moto ondoso, correnti, ecc.) lungo la costa. In questo contesto verrà inoltre svolta una ricognizione delle principali metodologie esistenti ai fini della previsione e gestione del rischio da mareggiata, di identificare le migliori pratiche e di formulare una proposta metodologica, che prenderà in considerazione tutti gli aspetti necessari alla costruzione di sistemi di previsione e gestione del rischio.

Prevedere e ridurre il rischio costiero.

Lungo le coste dell'arco marino transfrontaliero e, più in generale, lungo tutti i litorali, esistono numerose situazioni di potenziale pericolo per l'ambiente naturale, per gli insediamenti urbani o per la vita dell'uomo che vanno correttamente identificate e, ove possibile, previste, al fine di ridurre il rischio. L'ambiente costiero è infatti caratterizzato da un'intensa energia che si origina per effetto delle interazioni tra l'atmosfera e il mare, si propaga anche per lunghissime distanze e si scarica sulla costa durante le mareggiate che la investono. Alcune situazioni di pericolo per la vita umana possono peraltro derivare anche da condizioni di mare non estreme, ma che richiedono un'attenta analisi degli effetti locali.

La gestione del rischio, in generale, si affronta con gli strumenti di allertamento che sono adottati da parte della Protezione Civile, che richiede alla base una buona capacità di previsione degli effetti prodotti dal mare, e in particolare dal moto ondoso, lungo la costa. In questo senso l'attività in oggetto è complementare con quanto previsto nell'attività T2.5 sulla gestione del rischio costiero. Il cuore della presente attività è costituito dai prodotti previsionali in tempo reale. Occorre sottolineare che il rischio non è limitato agli effetti del moto ondoso ma anche ad effetti concomitanti, quali ad esempio il maggior rischio di alluvionamento causato, lungo la costa, dall'innalzamento del livello medio del mare a seguito di una mareggiata, che può determinare anche un maggior rischio di esondazione fluviale, oppure fenomeni pericolosi per la sicurezza dell'uomo, quali le rip currents.

Occorre infine sottolineare come, sul fronte della riduzione del rischio, sia opportuno disporre anche di dati pregressi che permettono di valutare l'impatto del mare sulla costa, affinando i metodi e i modelli in uso per la previsione in tempo reale. La mitigazione del rischio passa anche attraverso interventi strutturali che richiedono, alla base, sia la capacità di analizzare gli effetti prodotti dal mare sulla costa, sia la necessità di disporre di dati quanto più possibile accurati per la progettazione delle opere di difesa.

Quali rischi per quali territori.

I territori dello spazio di cooperazione transfrontaliero presentano caratteristiche di esposizione ai rischi molto complesse e variegate. I fattori di rischio variano lungo la costa, a seconda della tipo di costa (alta, bassa), della sua esposizione, delle sue caratteristiche geomorfologiche e sedimentologiche, ma anche dell'utilizzo e della fruizione della costa da parte dell'uomo.

Il "rischio da mareggiata" riguarda il potenziale distruttivo che ha l'azione combinata del moto ondoso e dell'innalzamento della superficie libera del mare lungo la costa. Quest'azione combinata può causare distruzione e smantellamento di tratti costieri e rappresentare un pericolo per gli insediamenti umani e le infrastrutture. L'inondazione delle aree costiere provocata dal mare rientra nella direttiva "Alluvioni" (2007/60/CE) relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni, anche se gli effetti del moto ondoso sono più complessi e possono ad esempio riguardare il potenziale distruttivo delle onde verso porti e infrastrutture anche in assenza di alluvionamento. Le stesse alluvioni di fiumi, torrenti, canali in prossimità della costa può avere, come concausa (non sempre), la presenza di livelli marini più alti lungo la costa, causati dall'azione concomitante del vento, della mareggiata, della pressione atmosferica o della marea astronomica, che pertanto necessitano di essere accuratamente previsti tramite modelli dedicati, meglio se integrati con osservazioni in-situ.

I. OBIETTIVI DEGLI STUDI RELATIVI ALLA GESTIONE DEL RISCHIO

A. Rischio, pericolosità, vulnerabilità ed esposizione

I fenomeni legati all'intensità del moto ondoso e delle correnti marine lungo la costa rappresentano un forte rischio per le zone densamente popolate della fascia costiera, persone e cose, e anche per l'ambiente naturale.

Il rischio si può esprimere in termini di pericolosità, intesa come probabilità di accadimento degli eventi possibili, e di danno per le aree considerate, in funzione della vulnerabilità e del valore economico/ambientale degli elementi significativi.

Nella letteratura internazionale si usano i seguenti termini:

H = pericolosità (Hazard): è la probabilità che un fenomeno di determinata intensità si verifichi in un certo intervallo di tempo e in una data zona;

V = Vulnerabilità: è la propensione di un elemento - persone, edifici, infrastrutture, attività economiche - a subire danneggiamenti in conseguenza delle sollecitazioni indotte da un evento di una certa intensità;

E = Esposizione o valore esposto: è il numero di unità, o "valore", di ognuno degli elementi a rischio, come vite umane o case, presenti in una data area.

La stima delle perdite conseguenti l'evento in termini sia di vite umane che economici implica la quantificazione della probabilità di occorrenza di un dato evento meteomarinico e del danno che ne potrebbe conseguire.

$$R = H \times V \times E$$

La pericolosità idraulica si stima mediante modellazione numerica ed è associata a fenomeni fisici che caratterizzano l'azione del mare sulla costa quali:

- o inondabilità da mareggiata intensa per effetto dell'azione del moto ondoso (storm surge, set-up, run-up) in caso di mareggiata caratterizzata da un tempo di ritorno elevato;
- o alluvionamento costiero determinato dall'azione sinergica della mareggiata e delle precipitazioni intense, con ridotta capacità di deflusso dei tronchi vallivi;
- o fenomeni erosivi indotti da mareggiate intense, strettamente connessi alla distribuzione del trasporto cross-shore;
- o progressiva erosione conseguente alla tendenza evolutiva della linea di riva a lungo termine, strettamente connessa alla distribuzione del trasporto long-shore (descritta nel rapporto metodologico T2.1.2);

Dall'analisi della pericolosità e del danno potenziale atteso è possibile determinare i diversi valori di rischio mediante l'applicazione di classiche matrici (MATTM, 2013), tipo quella riportata di seguito

CLASSI DI RISCHIO		PERICOLOSITA'					
		P3		P2		P1	
DANNO	D4	R4		R3		R2	
	D3	R4	R3	R3		R2	R1
	D2	R3		R2		R1	
	D1	R1		R1		R1	

Tabella 1 - Pericolosità, danno e classi di rischio

dove P rappresenta la probabilità di accadimento, D il grado di danno atteso, R il numero atteso di vittime/persone ferite/danni a proprietà, beni culturali e ambientali/distruzione o interruzione di attività economiche.

Le classi indicate per la pericolosità sono tre: P1 rappresenta una bassa probabilità - evento raro (tempo di ritorno superiore a 100 anni), P2 una media pericolosità - evento poco frequente (tempo di ritorno pari a 100 anni), P3 un'alta pericolosità - evento frequente (tempo di ritorno pari a 10 anni).

Le classi indicate per il danno sono quattro: D1 rappresenta un danno potenziale moderato o nullo, in quanto comprende le aree libere da insediamenti urbani o produttivi; D2 rappresenta un danno potenziale medio, in quanto comprende aree con limitati effetti sulle persone e sul tessuto socio-economico; D3 rappresenta un danno potenziale elevato, in quanto comprende le aree con problemi per l'incolumità delle persone e per la funzionalità del sistema economico, aree attraversate da linee di comunicazione e da servizi di rilevante interesse; D4 rappresenta un danno potenziale molto elevato in quanto comprende le aree in cui si può verificare la perdita di

vite umane, ingenti danni ai beni economici, naturali storici e culturali di rilevante interesse, gravi disastri ecologico-ambientali.

Incrociando i tre livelli di pericolosità e i quattro livelli di danno potenziale, si individuano quattro classi di rischio: R1 rappresenta un rischio moderato o nullo per il quale i danni sociali, economici ed al patrimonio ambientale sono trascurabili o nulli; R2 rappresenta un rischio medio per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche, R3 un rischio elevato per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socio-economiche e danni relativi al patrimonio ambientale; R4 un rischio molto elevato per il quale sono possibili perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture ed al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche.

Quindi dalle combinazioni della matrice del rischio si osserva che con un evento con una probabilità bassa di accadimento (P1) si può ottenere un rischio nullo (R1) o medio (R2) in base al danno potenziale atteso; con un evento con una probabilità di accadimento poco frequente (P2) si ottiene un rischio nullo (R1) solo nel caso di un danno nullo (D1), si ottiene un rischio elevato (R3) in caso di danno potenziale elevato (D3) e un rischio molto elevato (R4) nel caso di danno potenziale molto elevato (D4); con un evento frequente (P3) si può ottenere un rischio elevato (R3) già nel caso di danno potenziale medio (D2) e un rischio molto elevato (R4) già nel caso di danno potenziale elevato (D3).

B. Rischi per l'ambiente naturale e per quello costruito

Il rischio da mareggiata è spesso limitato ai danni per l'ambiente naturale e quello costruito, e può essere dovuto sia all'effetto delle mareggiate intense (moto ondoso ed innalzamento del livello del mare lungo la costa con conseguente inondazione) sia ai fenomeni associati di alluvionamento costiero.

Le mareggiate possono procurare danni ingenti alle strutture economiche lungo la costa. Come descritto in precedenza, il rischio aumenta non solo con la pericolosità (ovvero con la probabilità di accadimento), ma anche in funzione della vulnerabilità del bene e del valore esposto. A questo proposito si possono fare degli esempi.

Nel Maggio del 2013 (in particolare tra il 24 e il 25 Maggio) la costa toscana è stata investita da mareggiate di notevole intensità che hanno causato notevoli danni ai beni mobili e alle strutture degli stabilimenti balneari delle province di Massa-Carrara, Lucca, Pisa e Livorno (capanni, attrezzature per la spiaggia) e danni ambientali, come erosione delle spiagge e deposito di materiali da smaltire (lavarone, tronchi ed altro). In seguito a questi avvenimenti la Regione dichiarò lo stato di emergenza. La pericolosità di questo avvenimento è legata all'intensità di mareggiata, sicuramente anomala in relazione al periodo in cui si è manifestata (tarda primavera/inizio estate), e che tuttavia era stata correttamente prevista dai modelli previsionali operativi, per cui si sarebbero potuti prendere, con un certo anticipo, provvedimenti precauzionali per salvaguardare i beni. Il rischio di avvenimenti simili è ovviamente anche legato al fatto che molte strutture balneari erano state messe in piedi (con aumento del valore esposto) senza tener conto dei potenziali effetti di una mareggiata in quel periodo. È quindi importante che la pericolosità (in questo caso, la probabilità delle mareggiate particolarmente intense) sia stimata anche in relazione al periodo dell'anno, così come la vulnerabilità e il valore esposto possono variare con la stagione.

In molte zone dell'arco marino transfrontaliero, e in particolare lungo le coste della Liguria e della Toscana gli eventi importanti si originano in genere con un flusso superficiale di corrente da Sud e Sud-Ovest (Libeccio), spesso associati ad un flusso umido sull'Europa occidentale da Nord-Ovest, di origine atlantica. A questi eventi si accompagnano le mareggiate più intense. Forti mareggiate sulle coste occidentali dell'arco marino transfrontaliero possono quindi essere associate ad eventi alluvionali anche molto intensi. Queste mareggiate intense, possono a loro volta causare un notevole incremento del livello del mare in prossimità della costa che può ostacolare il normale deflusso delle acque. La combinazione di questi due fattori pertanto è un fattore di rischio per l'alluvionamento costiero non solo legato alle mareggiate, ma anche alla possibile esondazione dei corsi d'acqua in prossimità delle foci fluviali.

Questa fenomenologia si presenta con frequenza non trascurabile, ad esempio nel Novembre del 2014 l'area del litorale apuo-versiliese è stata investita contemporaneamente da precipitazioni di straordinaria intensità (con picchi di oltre 300 mm di precipitazione cumulata giornaliera) e, contemporaneamente, da mareggiate molto importanti (Figura 1). In quell'occasione sono esondati i torrenti Parmignola e Carrione con danni anche sul litorale e in prossimità della foce.

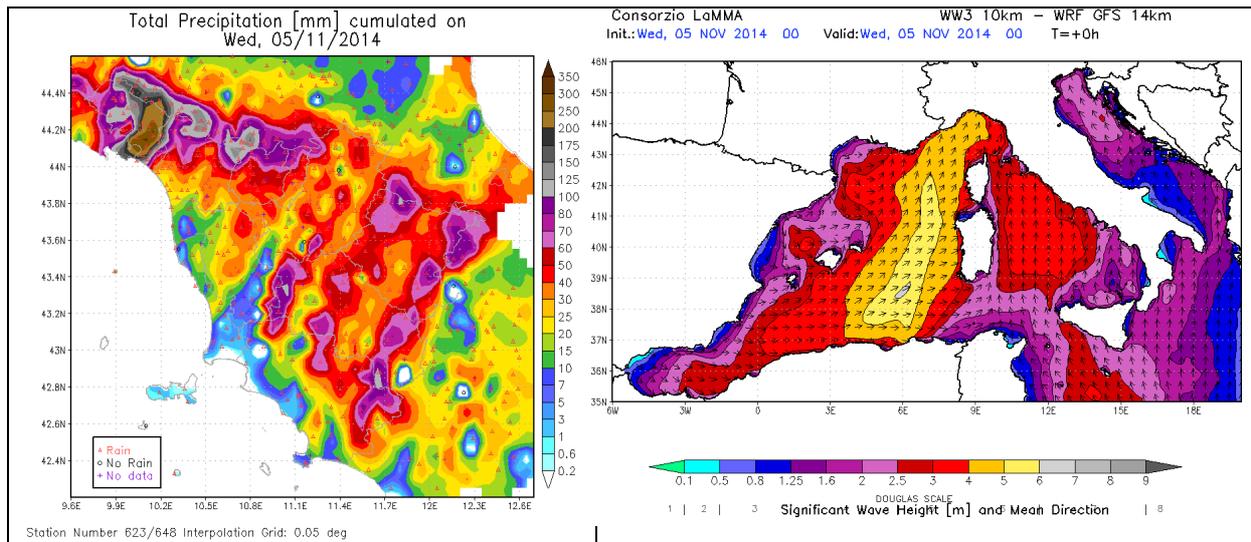


Figura 1 mappa di precipitazione cumulata in Toscana e mappa relativa allo stato del mare del 5 Novembre 2014.

C. Rischi per la vita umana

I rischi per la vita umana derivano dalle onde durante le mareggiate intense, dall'eventuale presenza di onde anomale e soprattutto dalle correnti di ritorno (rip currents). Onde di elevata ampiezza in prossimità della costa possono manifestarsi a causa di meccanismi di focusing dell'energia d'onda in alcune zone, dovuta ad effetti di rifrazione indotta da particolari conformazioni del fondo (shoal) o della costa. Occorre valutare l'effetto della riflessione delle onde sulla costa, che dipende sia da caratteristiche delle onde (in particolare dalla lunghezza delle onde incidenti), dalla pendenza del litorale e dalla tipologia del fondo (costa rocciosa o sabbiosa, presenza di scogli ecc.).

Oltre la metà degli annegamenti censiti è avvenuta in mare. Tra questi molti incidenti sono dovuti a situazioni di comportamento personale non adeguato (sottovalutazione del pericolo, mare mosso e incapacità di nuotare). Alcuni incidenti sono tipici della zona dei frangenti e, per lo più, si verificano col mare mosso, ma esistono situazioni in cui la vittima – che sa nuotare ed è in buona salute – non riesce a tornare a riva perché è trascinata via da una corrente o un altro ostacolo (il vento di terra, gli scogli, una struttura artificiale).

La presenza di celle costituite da opere di difesa rigide può favorire la creazione di correnti di ritorno con un flusso in uscita dai varchi tra le strutture caratterizzato da forte intensità, e una volta trascinati all'esterno il bagnante ha serie difficoltà a rientrare. Lo stesso meccanismo si può creare quando una corrente litoranea viene deviata verso il largo dalla presenza di una struttura ortogonale, come ad esempio un pennello.

Rip currents

Le correnti di risacca, o di ritorno, o *rip currents* sono correnti a getto che si originano nella fascia dei frangenti (*surf zone*) e possono manifestarsi in diversi tipi di spiaggia durante diverse condizioni di moto ondoso e di marea. Tali correnti si estendono tipicamente dalla riva verso il largo, oltre la riva dei frangenti, e presentano due regimi idrodinamici:

- 1) all'interno della surf zone, dove il flusso della corrente è mascherato dalle onde frangenti. Tuttavia in questa fascia la *rip current* può essere identificata come una "zona d'ombra" associata a onde non frangenti sopra varchi profondi, caratterizzata da una sorta di increspatura schiumosa e da un diverso colore dell'acqua (sulle tonalità del marrone) dovute al trasporto in sospensione dei sedimenti;
- 2) all'esterno della surf zone, dove il getto si diffonde all'interno di una zona di ricircolo.

Le rip currents hanno velocità intermittenti che possono rapidamente crescere a causa di larghi gruppi d'onda in arrivo o instabilità nella circolazione vicino a riva, fino ad alcuni metri al secondo.

Vari tipi di rip currents possono manifestarsi in corrispondenza di vari tipi di costa, un'ottima rassegna è fornita da un lavoro di review di Dalrymple et al. (2011). La maggior parte delle rip currents hanno un controllo morfologico (legato cioè alla presenza di conformazioni batimetriche, forme di fondo, come anche a strutture costiere), e sono forzate dalla rifrazione delle onde sopra una batimetria irregolare. Il caso forse più comune è dato dalla presenza di barre litoranee, parallele o sub-parallele alla linea di riva, in cui è inciso un varco più profondo (denominato *rip*

channel), in cui si incanalano le correnti di ritorno. Sono frequentemente generate quando la direzione delle onde incidenti è prossima alla perpendicolare alla linea di riva e comunemente osservate su spiagge con pendenza relativamente dolce dove la surf-zone è più larga. Su spiagge ripide le correnti di rip sono meno intense perché il frangimento avviene in prossimità della riva e la surf-zone è molto ridotta.

Tuttavia sono state anche osservate situazioni di rip currents in regime transiente che possono essere causate da fenomeni di instabilità idrodinamica (shear instabilities) di intense correnti longshore, quindi causate da correnti sensibilmente inclinate rispetto alla linea di riva. Altri meccanismi di generazione delle rip currents comprendono le interazioni onda-onda, i fenomeni di interazione tra idrodinamica e morfodinamica e le interazioni fra onda, correnti e strutture.

Le correnti di rip possono infatti generarsi in seguito all'interazione tra correnti e strutture. Questo caso comprende:

- A. la presenza di barriere emerse e sommerse lungo la riva; le barriere emerse infatti possono essere sormontate dalle onde, con conseguente innalzamento del livello del mare dietro la barriera e generazione di correnti di ritorno ai lati della stessa; le barriere sommerse, in corrispondenza dei varchi, riproducono la fenomenologia osservata in presenza di barre longitudinali interrotte da varchi.
- B. la presenza di pennelli che interrompono la corrente longshore, che viene così deviata verso il largo
- C. la combinazione di strutture parallele e trasversali, che formano celle di circolazione particolarmente pericolose;
- D. nelle pocket beach, in corrispondenza degli estremi della spiaggia.

II. METODI, MODELLI E SISTEMI DI PREVISIONE DEL RISCHIO COSTIERO

Nello sviluppo di un sistema previsionale meteomarinario finalizzato alla previsione e gestione rischio costiero è molto importante fare delle scelte adeguate riguardanti vari aspetti, quali:

- la scala di riferimento (scala di bacino, scala regionale, scala costiera, scala litoranea) e la modalità con cui rappresentare l'interazione tra scale diverse;
- gli aspetti salienti dei fenomeni da rappresentare anche in relazione alla scala (ad esempio, la generazione e propagazione delle onde a scala di bacino, lo studio dell'idrodinamica a scala litoranea, ecc.);
- le equazioni fisiche di base, le relative parametrizzazioni e le approssimazioni adottate;
- gli schemi numerici di soluzione;
- le eventuali modalità di accoppiamento e di interazione con altri modelli (es. per quanto riguarda la forzante atmosferica adottata);
- la discretizzazione spaziale e temporale.

Riguardo a quest'ultimo aspetto, è importante stabilire la risoluzione spaziale e temporale da utilizzare nei modelli per rappresentare il più correttamente possibile i fenomeni fisici alla scala di riferimento. Spesso si utilizza una tecnica di annidamento (*nesting*) dei modelli: si calcola prima la soluzione delle equazioni del modello a grande scala e a bassa risoluzione, e poi si utilizzano i dati ottenuti come condizioni al contorno per aree ridotte sulle quali si esegue il calcolo a risoluzione più alta.

Molte scelte sono vincolate dalle risorse di calcolo disponibili, che vanno dimensionate anche in relazione agli obiettivi.

A. Modelli di previsione meteomarina e idrodinamica da scala di bacino a scala costiera

I modelli di previsione meteomarina a grande scala simulano i processi di generazione, propagazione e trasformazione dell'onda in acque profonde e sono forzati da modelli atmosferici. I modelli di previsione meteomarina a scala locale hanno un'alta risoluzione sottocosta e considerano la propagazione del moto ondoso da acque profonde ad acque basse, includendo i fenomeni di rifrazione e di shoaling dovuti al fondale, mentre normalmente non includono gli effetti della diffrazione, riflessione e trasmissione dovute agli ostacoli, se non attraverso trattazioni approssimate di questi fenomeni.

Tra questi si possono elencare WAM (WAVE Model), WAVEWATCH III (WWIII), SWAN (Simulating Waves Nearshore), Delft3D-WAVE, TOMAWAC e MIKE21 – SW FM (Spectral Wave Flexible Mesh).

Questi sono modelli spettrali o di "terza generazione" che risolvono le equazioni di bilancio energetico ai nodi di una griglia (geografica o cartesiana), tenendo conto di tutti i processi che influenzano lo sviluppo del moto ondoso (trasferimento di energia dal vento, interazioni non lineari, dissipazioni per frangimento e attrito).

MODELLO	SITO	ARTICOLI RIFERIMENTO	GRIGLIA DI CALCOLO
WAM	www.bodc.ac.uk/data/documents/nodb/254628/	WAMDI Group, 1988	Strutturata
WWIII	http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/	Tolman, 1991	Strutturata e non strutturata
SWAN	http://swanmodel.sourceforge.net	Booij et al., 1999	Strutturata e non strutturata
Delft3D-WAVE	http://oss.deltares.nl/web/delft3d/delft3d-wave	Booij et al., 1999	Strutturata e non strutturata
TOMAWAC	www.opentelemac.org	Benoit et al., 1996	Non strutturata
MIKE21-Spectral Wave Module FM	https://www.mikepoweredbvdhi.com/products/mike-21/waves/spectral-waves	SØRENSEN et al, 2004	Non strutturata

Tabella 2 – Modelli di riferimento per la previsione del moto ondoso

Questi modelli presentano molte caratteristiche comuni tra loro, e spesso condividono molte formulazioni e parametrizzazioni dei vari processi fisici, quali:

- input del vento
- white-capping
- interazione non lineari onda-onda
- dissipazione dovuta al fondale
- frangimento dell'onda
- effetti di interazione onda-corrente

Gli output dei modelli comprendono l'altezza significativa dell'onda, le informazioni riguardanti il periodo (medio, di picco) e la direzione associata, le informazioni spettrali riguardanti la distribuzione dell'energia a differenti lunghezze d'onda.

I modelli che hanno una storia più lunga di implementazioni operative sono WAM e WWIII.

Il WAM, sviluppato dal Wave Model Development and Implementation Group (WAMDl), è operativo dal 1992 presso il Centro Europeo di Reading (ECMWF) per la previsione in tempo reale del moto ondoso da scala globale a scala di bacino.

Il WWIII, sviluppato presso il Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB) del NOAA / NCEP, fornisce previsioni di moto ondoso operative per il NOAA.

Oltre ai modelli di previsione delle onde, informazioni aggiuntive a scala di bacino e costiera riguardano alcune variabili di caratterizzazione fisica dello stato del mare che possono essere dedotte dai modelli di simulazione idrodinamica utilizzati nell'ambito delle attività di oceanografia operativa. Queste informazioni riguardano le correnti marine (anche per la valutazione degli effetti di interazione tra onde e correnti), la temperatura dell'acqua, la torbidità e soprattutto il livello del mare.

Esistono molti modelli adatti a svolgere questo compito, tra i quali si possono menzionare ROMS (Regional Ocean Modeling System), NEMO, MITgcm, MARS 3D, HYCOM3D (HYbrid Coordinate Ocean Model), MIKE 3D, POM (Princeton Ocean Model), SHYFEM.

Quasi tutti questi codici risolvono le equazioni primitive di un mezzo incomprimibile, idrostatico secondo l'approssimazione di Boussinesq, tranne il codice MITgcm che è non idrostatico. Le coordinate verticali possono essere sigma, sigma generalizzate, isopiche (strati alla stessa densità), zeta, oppure miste (come in NEMO).

Quasi tutti i codici utilizzano inoltre maglie a griglia strutturata o al massimo curvilinea, tranne SHYFEM che utilizza una griglia non strutturata ed è particolarmente adatto per le applicazioni costiere.

Presso il Consorzio LaMMA, ad esempio, viene utilizzato ROMS, un sistema di modellazione oceanica sviluppato a partire dal 2001 che risolve le equazioni primitive del moto a superficie libera utilizzando un sistema di coordinate verticali sigma e comprende vari schemi sia per la turbolenza verticale, sia per la stima dei flussi turbolenti di superficie. Il modello del LaMMA è configurato su un'area ampia del Mediterraneo Occidentale che comprende il bacino Ligure e Tirrenico, alla risoluzione di $1/72^\circ$ (circa 1,3 km). Oltre alle equazioni principali, il sistema di modellazione utilizza anche altre equazioni fisicamente basate per una serie di sottomoduli finalizzati alla simulazione di dinamiche ecosistemiche e biogeochimiche, la dinamiche dei sedimenti in sospensione e la relativa morfodinamica dei fondali (a larga scala). Il codice comprende inoltre moduli per l'assimilazione variazionale (4DVAR).

B. Sistemi operativi di previsione meteomarina

Nella modellistica meteomarina le informazioni relative al vento giocano un ruolo predominante nella determinazione del moto ondoso e l'estrema sensibilità delle variabili dello stato di mare alle variazioni del vento ha una forte implicazione soprattutto a livello previsionale. I dati previsionali di vento ottenuti da modelli atmosferici vengono utilizzati come forzanti fisiche nei modelli di moto ondoso a grande, media e piccola scala. In uscita dai modelli di moto ondoso si ottengono i dati di altezza d'onda significativa, periodo e direzione d'onda. Queste variabili sono ottenute come post processing di dati spettrali, in quanto lo spettro di energia contiene le informazioni più complete relative allo stato del mare. Di seguito si riporta la schematizzazione della catena previsionale.

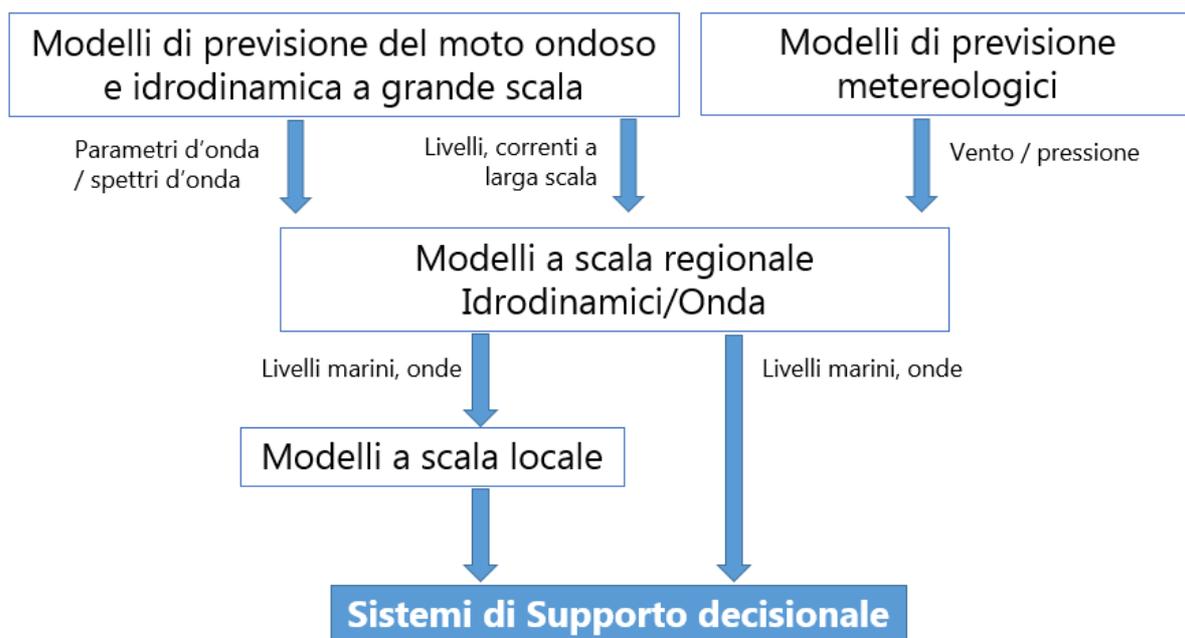


Figura 2 schema della catena previsionale di un sistema di previsione meteo-oceanografica a scala costiera.

Sistemi di previsione meteomarina sono stati implementati e girano operativamente presso numerosi enti che forniscono dati per l'area marina transfrontaliera, fra i quali il Consorzio LaMMA, ARPAL e Università di Genova, SHOM & Météo France, ISPRA, Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica (CNMCA).

ENTE	SITO	CARATTERISTICHE
Consorzio LaMMA	http://www.lamma.rete.toscana.it/mare/modelli/w3-info-sul-modello	0.1° (circa 10km) sul Mediterraneo x 120 h; 0,02° (circa 2.5km) sul Mar Ligure x 60 h
ARPAL & Università di Genova	https://www.arpal.gov.it/homepage/meteo/modelli.html http://www.dicca.unige.it/meteocean/model.html	10km su Mar Mediterraneo, 2km Mar Ligure x 120h
SHOM & Météo France	https://www.meretmarine.com/fr/content/un-nouveau-site-pour-les-previsions-de-vagues http://www.meteofrance.com/previsions-meteo-marine/marine/houle/mediterran	Griglia non strutturata, risoluzione varia da 2km a 500m a costa x 60h
ISPRA	http://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/simm.html	10km su Mar Mediterraneo x 84h
CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_WAV_06_017	1/6° sull'Oceano Nord Atlantico, 1/24° sul Mar Mediterraneo x 120h
CNMCA	http://www.meteoam.it/modelli-di-previsione-numerica	3' Mar Mediterraneo, 1' Italia x 72h

Tabella 3 – Sistemi di previsione meteomarina implementati nell'area marina transfrontaliera

Nella maggior parte di questi sistemi normalmente è presente:

- una componente di previsione meteorologica ad area limitata (LAM), normalmente innestata su un modello di previsione globale (ad esempio GFS, ECMWF, ecc.)
- una componente di previsione del moto ondoso a più scale (da scala di bacino e spesso a scale di maggior dettaglio)
- una componente di previsione idrodinamica

- delle componenti di previsione a scala locale che possono essere utilizzate per fornire informazioni ai sistemi di supporto alle decisioni.

C. Metodi e modelli per la previsione dell’impatto delle onde lungo la costa

Per la previsione dell’impatto delle onde lungo la costa vengono utilizzati modelli che stimano il run-up, cioè l’altezza di risalita delle onde incidenti sulla spiaggia emersa. Questi modelli si trovano spesso accoppiati con una componente morfodinamica in grado di descrivere l’evoluzione del fondale durante la mareggiata.

Il modello in questo momento più utilizzato per questo scopo (più a livello di ricerca, ma con possibilità di implementazione operativa) è XBeach, un modello open-source bidimensionale sviluppato da Delft University of Technology per simulare i processi idrodinamici e morfodinamici e gli impatti su coste sabbiose a scala di mareggiata. XBeach è stato originariamente sviluppato come un modello di risoluzione delle variazioni di onde corte alla scala del gruppo d’onde e quindi anche delle onde lunghe ad esse associate (Roelvink et al. 2009). In seguito nel modello sono state implementate un numero di opzioni aggiuntive, consentendo in tal modo agli utenti di scegliere le scale temporali da risolvere: il modello include i processi idrodinamici della trasformazione di onde corte (rifrazione, shoaling, frangimento), trasformazione di onde lunghe (generazione, propagazione e dissipazione), i processi di set-up d’onda, overwash, inondazione. I processi morfodinamici includono il trasporto dei sedimenti al fondo e in sospensione, la rottura della duna, e l’aggiornamento dinamico dei fondali. XBeach ha tre tipologie di simulazione: a) modo stazionario, usato per modellare, ad esempio, i cambiamenti morfologici durante condizioni di onda generate da vento; b) modo non stazionario (*surfbeat mode*), usato su spiagge dissipative; c) modo non idrostatico (*wave resolving mode*) dove si usano anche le equazioni Nonlinear Shallow Water (NLSW), usato soprattutto per la simulazione di run-up su spiagge molto pendenti e l’overwash. XBeach permette quindi una simulazione idrodinamica molto avanzata dell’area nearshore che comprende, ad esempio, anche le rip currents (Benassai et al. 2017, Winter et al. 2012).

Il modello XBeach in versione non idrostatica è stato inizialmente sviluppato da TU Delft come versione prototipale del SWASH, un modello onda-correnti non idrostatico usato per studiare le trasformazioni dell’onda da largo a costa, le dinamiche tipiche della zona dei frangenti (*surf-zone*) e della zona di *swash*.

Alcuni modelli, come ad esempio modello SBEACH (Storm-induced BEACH CHange) sviluppato dal CEDAS, simulano i processi idrodinamici e di moto ondoso con l’obiettivo principale di stimare l’erosione della spiaggia, della berma e della duna in seguito a mareggiate, e quindi rientrano più nell’ambito dei modelli di simulazione morfodinamica.

Esistono infine modelli di simulazione del moto ondoso alla Boussinesq (Boussinesq-type wave models), che risolvono le onde in fase, in modalità 1DH (monodirezionale) e 2DH (bidirezionale). Tra questi modelli vanno citati: FUNWAVE (sviluppato all’Università di Delaware, oggi anche nella versione TVD), MIKE21-BW (sviluppato da DHI) e Triton (sviluppato da Deltares ma attualmente non in commercio). Questi modelli sono tradizionalmente applicati per il calcolo dei coefficienti di agitazione delle onde incidenti all’interno di un porto, e includono la rappresentazione della maggior parte dei processi fisici di interesse quali shoaling, rifrazione, diffrazione, riflessione e trasmissione, interazione non lineare tra le onde. Gli sviluppi di questi modelli riguardano: il frangimento d’onda (attraverso metodi “shock-capturing”), la risalita delle onde sulla spiaggia, la trasformazione di onde non lineari dalle acque profonde, attraverso la zona di frangimento fino alla battigia, processi quali il run-up e l’undertow. Normalmente questi modelli non considerano nessun processo morfologico e quindi possono sottostimare l’impatto delle onde sulla costa.

MODELLO	SITO	PROCESSI MORFODINAMICI
XBeach	https://oss.deltares.nl/web/xbeach/	si
SWASH	swash.sourceforge.net	si
SBEACH	http://www.veritechinc.com/products/cedas/cedas-details	si
MIKE21-BW	https://www.theacademybydhi.com/the-academy-by-dhi/course-description/coast-and-marine/overview/mike-21-bw	no
FUNWAVE-TVD	https://fengyanshi.github.io/build/html/index.html	si

Tabella 4 – Modelli di previsione dell’impatto delle onde sulla costa e le infrastrutture

D. Modelli idrodinamici a scala locale per la previsione dei rischi

Il sistema di correnti litoranee che si sviluppa nelle acque basse per effetto del moto ondoso è senza dubbio il più importante ai fini del trasporto solido litoraneo, della stima di erosione/deposito e quindi dell'evoluzione di linea di riva. Questi processi devono essere studiati con modelli a scala locale ad alta risoluzione al fine di analizzare correttamente i rischi. La circolazione si suddivide in correnti longitudinali e correnti trasversali localizzate (rip-currents), la cui distribuzione dipende dalla conformazione della batimetria. A queste si sovrappone la corrente di *undertow* sul fondo diretta dalla riva verso il largo, che dà conto della natura tridimensionale del flusso.

Modelli di simulazione idrodinamica a scala litoranea e in situazione tipiche di acqua bassa (*shallow water*) risolvono normalmente un set di equazioni idrodinamiche 2D (come nell'approccio classico), 3D o quasi-3D. Sono modelli di solito piuttosto onerosi dal punto di vista computazionale, e quindi raramente usati per finalità operative. Tuttavia, ai fini della previsione del rischio di breve periodo (da mareggiata), possono essere utilizzati per una miglior comprensione e caratterizzazione delle rip currents, per il calcolo del setup d'onda e anche per evidenziare le aree potenzialmente inondabili. La simulazione delle correnti a scala litoranea tuttavia passa dalla stima delle componenti di forzante aggiuntiva dovute al moto ondoso nella zona dei frangenti (a cui normalmente viene dato il nome di *radiation stress*), per cui questi modelli vanno necessariamente accoppiati a modelli di simulazione delle onde a scala litoranea in grado di rappresentare almeno rifrazione/shoaling d'onda e frangimento.

Tra questi modelli idrodinamici vanno citati il Delft3D-FLOW, il MIKE 21 HD (Hydrodynamics), SHORECIRC, TELEMAC e FINEL 2D/3D, oltre ad altri riportati in tabella.

I modelli risolvono le equazioni di moto vario in due (valori mediati sulla verticale) o in tre dimensioni considerando un sistema costituito dalle equazioni orizzontali del moto, l'equazione di continuità e le equazioni di trasporto, in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate (onda, vento, marea, portate fluviali). Di solito vengono risolte le equazioni di Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations - RANS) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica.

Di seguito vengono riassunti i modelli qui brevemente descritti:

MODELLO	SITO	RANS
Delft3D-FLOW	https://oss.deltares.nl/web/delft3d	si
MIKE21-HD	https://www.mikepoweredbydhi.com/the-academy-by-dhi/course-description/coast-and-marine/overview/mike-21-flow-model-hd-fm	si
SHORECIRC	http://www1.udel.edu/kirby/programs/nearcom/circulation_module_shorecirc.html	Si
TELEMAC	http://www.opentelemac.org/index.php/presentati-on?id=17	Si
FINEL 2D/3D	http://www.finel.nl/index.html	Si/no
LISFLOOD-FP	http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/	
SELFE	http://www.stccmop.org/knowledge_transfer/software/selfe	si

Tabella 5 – Modelli idrodinamici a scala costiera e litoranea

E. Contributo della modellistica meteo-oceanografica alla previsione del rischio di inondazione

La previsione del rischio di inondazione richiede l'utilizzo di una serie di modelli numerici in cascata che simulano determinati scenari di rischio e forniscono un'idea del potenziale scenario di emergenza.

La parte di modellistica meteo-oceanografica permette la propagazione del moto ondoso da largo a costa e la stima dei livelli dovuti a vari input quali pressione atmosferica, vento, marea e moto ondoso. I modelli a grande scala possono essere utilizzati per individuare degli hotspot dove il rischio da inondazione è maggiore che andranno analizzati in dettaglio con modelli a scala locale. Una possibile strategia modellistica è quella che prevede l'utilizzo di sistemi dinamicamente accoppiati, quali il sistema COAWST (Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave- Sediment Transport Modeling System) in cui sono stati dinamicamente accoppiati, tramite un tool di scambio dinamico di dati noto come MCT (Model Coupling Toolkit), il modello oceanografico ROMS, il modello meteorologico WRF, il modello d'onda SWAN e gli strumenti per il calcolo del trasporto solido sviluppati all'interno del Community Sediment Transport Modeling Project.

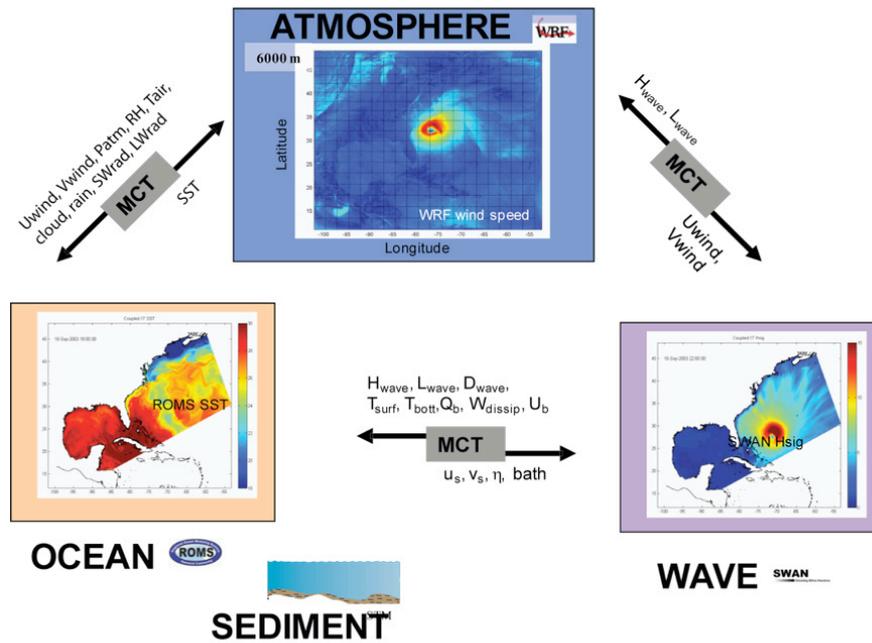


Figura 3 Il sistema COAWST.

Avendo a disposizione modelli digitali del terreno (DTM) e rilievi topo-batimetrici della spiaggia emersa e sommersa e delle eventuali strutture poste a protezione della spiaggia stessa, mediante i modelli 1DH/2DH citati al paragrafo C, è possibile calcolare il set-up e il run-up dell'onda sulla spiaggia e sulle strutture di protezione. Il calcolo del run-up deve essere effettuato per tutti i profili in cui è stato suddiviso il tratto di costa e in esame.

L'ulteriore accoppiamento con modelli di previsione idrologica e idraulica (per la propagazione delle onde piena), consente di completare la previsione del rischio per le aree costiere e di realizzare l'obiettivo di un sistema di previsione completa ai fini della gestione del rischio da inondazione per le aree costiere. Va riconosciuto che questo sforzo di modellazione è notevole e che, ad oggi, nell'arco marino transfrontaliero, si è lontani dalla realizzazione di un sistema operativo completo basato su tutti questi elementi.

F. INDICI PER LA STIMA DEL RISCHIO COSTIERO

Nella stima del rischio da mareggiata è possibile ricorrere a varie metodologie. Una prima possibilità è quella di utilizzare i dati meteomarini lungo la costa così come sono, cercando di dedurre livelli di rischio in relazione alla conoscenza del territorio. All'estremo opposto, si può ipotizzare di realizzare sistemi di allerta basandosi su una complessa configurazione di modelli in cascata e che, nella parte finale, utilizzano modelli di impatto delle onde sulla costa, tipo XBeach.

Ai fini della costruzione di una procedura di allertamento, un'altra possibilità, molto meno complessa da realizzare, riguarda l'implementazione di metodi/modelli più semplici, basati sull'utilizzo di pochi parametri sintetici (es. altezza d'onda, lunghezza d'onda, pendenza della spiaggia), combinati tra loro nella forma di indici di facile implementazione. Alcuni di questi indici vengono descritti di seguito.

Indici per il rischio da mareggiata

Una stima del rischio da mareggiata è stato ottenuto da Besio e al. (2015) tenendo in considerazione due aspetti delle mareggiate: l'entità della possibile risalita del moto ondoso sulla spiaggia (*run-up*) e la persistenza della mareggiata (*E*).

L'indice di rischio (*HI*) così ottenuto è il seguente:

$$HI \propto (\sqrt{HL}, E)$$

Il contributo relativo al *run-up* (HI_w) è considerato proporzionale alla radice quadrata dell'altezza (*H*) e della lunghezza d'onda (*L*), scalato rispetto alle massime condizioni di rischio (valori di H_{max} e L_{max}) e riscalato tra i valori da 0 (minimo rischio) a 10 (massimo rischio). Quindi HI_w risulta pari a

$$HI_w = \sqrt{HL} \frac{10}{\sqrt{H_{max}L_{max}}}$$

Il contributo relativo alla persistenza della mareggiata (HI_E) è valutato attraverso la stima dell'energia contenuta in un certo intervallo di tempo (3, 5 e 11 ore), scalato rispetto alla massima energia E_{max} e riscaldato tra i valori da 0 (minimo rischio) a 10 (massimo rischio). Quindi HI_E risulta pari a

$$HI_E = 10 \left(1 - \frac{E_{max} - E}{E_{max}} \right)$$

Questi due coefficienti sono stati accoppiati linearmente tramite un coefficiente di accoppiamento X e quindi l'indice di rischio HI risulta pari a

$$HI = HI_w X + (1 - X) HI_E$$

L'indice di rischio costiero può essere calcolato anche considerando la vulnerabilità sia ambientale che sociale. Mavromatidi et al. 2018 stima l'indice di rischio costiero sovrapponendo due indici empirici: il *Coastal Sensitivity Index (CSI)* e il *Social Vulnerability Index (SVI)*.

Il *CSI* è basato sui parametri fisici della costa e nello studio di Mavromatidi et al. 2018 viene calcolato sulla base di 6 parametri come

$$CSI = \sqrt{\frac{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f}{6}}$$

dove a è la geomorfologia (costa bassa, costa alta, ...), b la pendenza (%), c l'innalzamento del livello marino (mm/anno), d l'arretramento/avanzamento della linea di riva (m/anno), e l'intervallo livello medio della marea (m), e l'altezza d'onda media significativa (m). Queste variabili sono classificate con valori da 1 (molto basso) a 5 (molto alto) sulla base della tabella sottostante

Variables	Sensitivity categories				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
a	Rocky, cliff coasts	Medium cliffs, indented coasts	Low cliffs, alluvial plains	Cobble beaches, lagoons	Barrier beaches, deltas, beaches
b (%)	> 12	12-9	9-6	6-3	< 3
c (mm/yr)	< 1.8	1.8-2.5	2.5-3.0	3.0-3.4	> 3.4
d (m/yr)	> 2.0	1.0-2.0	-1.0-1.0	-2.0 to -1.0	≤ 2.0
e (m)	> 6.0	4.0-6.0	2.0-4.0	1.0-2.0	< 1.0
f (m)	< 0.55	0.55-0.85	0.85-1.05	1.05-1.25	> 1.25

L'indice *SVI* valuta la vulnerabilità sociale e nello studio di Mavromatidi et al. 2018 è ottenuto sulla base di 9 parametri: popolazione al di sotto di 14 anni, popolazione al di sopra di 75 anni, donne, famiglie con un solo genitore, famiglie con più di due figli, affittuari, densità di popolazione media (abitanti/km²), disoccupati, popolazione senza laurea, stranieri.

Per la stima dell'indice *SVI* possono essere usate differenti metodologie. Lo studio di Mavromatidi et al. 2018 calcola questo indice come

$$SVI = \frac{A + B}{2}$$

dove A è la media dei valori delle variabili normalizzate, B è il numero delle variabili determinanti dopo la loro normalizzazione. La normalizzazione viene ottenuta come

$$Z = \frac{(x - \mu)}{sd}$$

dove x sono i valori iniziali della variabile, μ la media, sd la deviazione standard.

Le variabili determinanti sono considerate per dare maggiore peso alle aree che hanno un maggior numero di gruppi di popolazione vulnerabili e nello studio di Mavromatidi et al. 2018 sono quelle variabili (fra le 9 analizzate) che hanno valore di deviazione standard maggiore o uguale a 0.5.

I risultati finali di entrambi gli indici e la loro categorizzazione nelle cinque categorie di sensibilità/vulnerabilità si basa sulla deviazione standard dal valore medio: dai più bassi (≤1 deviazione standard) ai più alti (>1 deviazione standard).

Gli indici di rischio sono dati dalla combinazione della sensitività costiera, cioè la predisposizione della costa a essere inondata in seguito a un scenario di rischio, e della vulnerabilità costiera, valutata sulla base della valenza economica della parte naturale e antropica (sito di interesse comunitario, sito archeologico, sito con vincoli ambientali, habitat costiero, costa antropizzata ...).

Alla base della stima dell'indice di rischio deve esserci un calcolo del tempo di ritorno dell'accadimento dello scenario di rischio analizzato mediante un'analisi degli eventi estremi mediante ad esempio la distribuzione di Gumbell, Weibull o altre similari (ad esempio, la distribuzione generalizzata di Pareto).

Gli indici di rischio devono essere normalizzati secondo una procedura standardizzata per rendere comprensibile il confronto tra aree costiere differenti.

G. Progetti riguardanti la valutazione del rischio costiero

Nell'analizzare il rischio costiero è necessario considerare numerosi fattori differenti (sociali, economici, ambientali, ...) su aree vaste e in tempi differenti. Gli strumenti basati su GIS sono un modo efficace per raccogliere tutte queste informazioni in una piattaforma unica e fornire un supporto decisionale nella gestione del rischio (DSS *Decision Support System*).

In letteratura esistono numerosi progetti (elencati di seguito) che hanno sviluppato *tool* DSS con lo scopo di identificare e analizzare la vulnerabilità, gli impatti e i rischi di determinate aree e fornire un supporto decisionale della gestione del rischio (Zanuttigh et al., 2014).

Uno degli ultimi progetti sviluppati è stato il RISC-KIT (Resilience Increasing Strategies for Coasts Toolkit). All'interno del progetto è stata sviluppata la metodologia CRAF (Coastal Risk Assessment Framework) che prevede una prima fase di valutazione, a scala regionale (dell'ordine dei 100 km), del rischio e dei relativi impatti, al fine di identificare gli hotspot (definiti come luoghi con il più alto rischio) che vengono successivamente analizzati in maniera dettagliata nella seconda fase secondo la tecnica MCA (Multi-Criteria Analysis).

Riguardo al rischio associato alle rip currents, il National Weather Service americano del NOAA fornisce per la zona Philadelphia/Mt Holly (<https://www.weather.gov/phi/surfRip4#>) un forecast delle correnti di rip che allerta surfisti e bagnanti sul rischio. Vengono prodotte mappe dell'area in esame suddividendo il rischio in basso, medio e alto e sottolineando che anche con rischio basso, le correnti di rip si possono comunque generare in presenza di opere.

NOME	ANNO	RIFERIMENTO	PROCESSI	CARATTERISTICHE
 Coastal-Simulator NOC	2000-	Mokrech et al., 2009 Dawson et al., 2009	Mareggiata Innalzamento livello del mare Inondazione Erosione costiera	Per la pianificazione e gestione del litorale il progetto sviluppa un simulatore a lungo termine (Tyndall Coastal Simulator) dei processi costieri ipotizzando diversi scenari di potenziali impatti e relativa incertezza. Il simulatore si basa su una serie di modelli climatici collegati (CM) all'interno di un quadro annidato che riconosce tre scale spaziali: (i) la scala globale (GCM); (ii) la scala regionale e (iii) il dominio del simulatore (un'unità fisiografica, come una sottocella costiera).
 CVAT	1999-	Flax et al., 2002	Multi-rischio Mareggiate Eventi estremi (tornado, terremoti,...)	Il CVAT (Community Vulnerability Assessment Tool) è una metodologia sviluppata da NOAA per la valutazione del rischio e della vulnerabilità di un'area costiera e per supportare le amministrazioni nella riduzione/mitigazione del rischio. Vengono analizzate le diverse tipologie di rischio per step successivi: strutture presenti, fattori economici, impatti ambientali.
 DESYCO	2005-2010	Torresan et al., 2010	Innalzamento livello del mare Mareggiate Inondazione Erosione costiera Qualità dell'acqua	DESYCO (DEcision support SYstem for Coastal climate change impact assessment) propone una metodologia che integra i risultati di modelli meteorologici a grande scala, con quelli idrodinamici, morfodinamici e biogeochimici ad alta risoluzione, per valutare i molteplici impatti ambientali e socio-economici sui sistemi costieri (ad esempio spiagge, delta fluviali, estuari e lagune, zone umide, aree agricole e urbane).
DIVA	1999-	Hinkel e Klein, 2009	Innalzamento livello del mare Mareggiate Inondazione Erosione costiera Cambiamento aree umide	DIVA (Dynamic Interactive Vulnerability Assessment model) comprende quattro componenti principali: database globale dettagliato dei dati costieri biofisici e socio-economici; scenari a lungo termine (fino al 2100) di innalzamento di livello del mare e analisi socio-economica; modello integrato che valuta gli impatti biofisici e socio-

			Intrusione salina		economici e gli effetti potenziali e i relativi costi; interfaccia grafica per la selezione di dati e scenari.
	2001-2004	Schirmer et al, 2003	Innalzamento del mare Mareggiate Erosione costiera	livello	KRIM (Climate Change and Preventive Risk and Coastal Protection Management) analizza le conseguenze di un aumento del livello del mare e di scenari climatici relativi all'anno 2050 e dei possibili impatti ed evoluzioni degli ambienti naturali e artificiali.
	2008-2011	http://www.micore.eu/index.php	Mareggiata Dati mareggiate Morfologia Impatto economico	storici socio-economico	Sviluppo di una mappatura probabilistica dell'impatto morfologico delle mareggiate e produzione di sistemi di allarme e informazione. 9 nove casi di studio. Attualmente solo per la Spiaggia Lido di Dante (IT) sono forniti risultati modello X-Beach, mappe di rischio, previsione altezza d'onda (modello SWAN), previsione livello marino (AdriaROMS), livello del mare in tempo reale.
	2013-2017	http://www.risckit.eu/np4/home.html Viavattene et al, 2018 De Angeli et al, 2017 Armaroli et al, 2017 Ferreira et al, 2016 Bogaard et al, 2016	Innalzamento del mare Inondazione Database mareggiate Erosione costiera Fattori economici, popolazione, edifici e proprietà privata, infrastrutture, siti archeologici e culturali	livello	Il progetto RISC-KIT (Resilience Increasing Strategies for Coasts Toolkit) fornisce un WEB-GIS contenente informazioni relative agli eventi di inondazione nei siti dei casi studio, forzanti ambientali, osservazioni e dati di hindcast, scenari climatici, impatti osservati e dati socioeconomici, culturali e ambientali quantitativi e qualitativi. Analizza gli impatti sull'economia, sulla popolazione, su edifici e proprietà privata, sull'ambiente, sulle infrastrutture, siti archeologici e culturali. Il progetto ha sviluppato per gli 11 siti di studio europei (e in linea di principio per qualsiasi altra area costiera) un sistema per l'allarme precoce e per il supporto decisionale (EMS/DSS). Il sistema è composto da: un sistema di previsione dell'intensità del pericolo ottenuta accoppiando modelli meteorologici, idrodinamici e morfodinamici e da un sistema di supporto alle decisioni (DSS) che integra i rischi e gli impatti ambientali e socio-economici. Come piattaforma di gestione di dati è utilizzato il Delft-FEWS, che è altamente flessibile e può essere configurato per importare e visualizzare i dati (idrodinamici/meteorologici), eseguire simulazioni di modelli, convalidare i dati in tempo reale, ecc.
	2005-	Warrick (2009)	Innalzamento del mare Inondazione Erosione costiera	livello	Il sistema SimCLIM ha un sistema integrato verticalmente che collega dati e modelli globali, con modelli a scala locale e settoriale per l'analisi di impatti ad esempio sulle coste, l'agricoltura, la salute umana.
	2010-2013	http://www.theseusproject.eu Zanuttigh et al, 2014	Innalzamento del mare Inondazione Erosione costiera Scenari socio-economici	livello	THESEUS (Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate) fornisce una metodologia integrata per la pianificazione di strategie di difesa sostenibili per la gestione dell'erosione costiera e delle inondazioni, analizzando aspetti tecnici, sociali, economici e ambientali. Il progetto ha inoltre esaminato l'applicazione di tecnologie innovative con lo scopo di rendere la costa sicura (o a basso rischio) per l'uomo e l'ecosistema.
	& -	https://tidesandcurrents.noaa.gov/water_level_info.html	Livello del mare Dati mareggiate Eventi estremi Inondazione	storici	NOAA mediante più di 200 stazioni permanenti negli USA, fornisce un servizio di previsione di marea negli USA. Inoltre il NOS (National Ocean Service) ha sviluppato un Inondation Dashboard che fornisce i livelli del mare in tempo reale e informazioni su l'inondazione nelle stazioni scelte.

III. CONTENUTI DELLA RELAZIONE TECNICA SUL RISCHIO A BREVE TERMINE

La relazione tecnica sul rischio a breve termine deve contenere le informazioni pertinenti, sito-specifiche, atte alla caratterizzazione dell'impatto del mare sulla costa, al fine di realizzare sistemi di previsione e di allerta quali quelli descritti nel successivo capitolo.

La relazione rappresenta pertanto un livello preliminare di analisi, ai fini della caratterizzazione dei potenziali rischi e contiene informazioni relative alle caratteristiche naturali della costa (geomorfologia, sedimentologia, moto ondoso, idrodinamica), alle caratteristiche antropiche (uso della costa) e alla metodologia usata per la stima dell'impatto delle sollecitazioni idrodinamiche e di moto ondoso sulla costa (quali run-up, caratteristiche delle onde, alluvionamento, rip currents).

A. Caratteristiche geomorfologiche e sedimentologiche

Nell'analisi del rischio da mareggiata bisogna conoscere le caratteristiche geomorfologiche (forme di fondo e scabrezza) e sedimentologiche (granulometria media e varianza dei sedimenti fino alla profondità di chiusura) dell'area costiera in esame, importanti per uno studio idrodinamico/morfologico di dettaglio.

Il rischio da mareggiata dipende dal tipo di costa (alta o bassa), dal tipo di spiaggia (sabbia oppure ghiaia), dalla pendenza dei fondali antistanti, dalla presenza o meno di un apparato dunale retrostante (presente solo su costa bassa), dalla presenza di opere trasversali e longitudinali che possono indurre importanti fenomeni di riflessione, dal trend evolutivo di breve e medio periodo (se tratto in erosione o accumulo), dall'ampiezza della spiaggia emersa, dalla presenza di elementi antropici.

Su costa bassa risulta fondamentale stimare il sovrizzo e il run-up per individuare le eventuali aree di inondazione. Una spiaggia molto ampia permette di dissipare maggiormente il moto ondoso senza fenomeni di riflessione. Inoltre la presenza di dune costiere risulta essere un elemento di stabilizzazione oltre che di difesa naturale dalle mareggiate per le aree retrostanti. Le dune forniscono, naturalmente, materiale alla spiaggia nei momenti di crisi erosiva: una spiaggia in erosione, con apparati dunari retrostanti, può risultare per un certo periodo di tempo interessata da fenomeni di arretramento meno rilevanti di quanto sarebbe senza dune. Le opere trasversali o longitudinali possono generare dei fenomeni di riflessione e la formazione di *rip current*. Le correnti di *rip* sono inoltre comunemente osservate su spiagge con pendenza dolce dove la zona attiva (*surf zone*) è più ampia, mentre sono meno intense su spiagge pendenti a causa del frangimento molto vicino a riva.

Su costa alta è importante studiare l'instabilità dei versanti costieri considerando i fattori geologici, idrodinamici e climatici, andando a confrontare le caratteristiche della costa in esame con i meccanismi che possono attivare i fenomeni di instabilità (Unità operativa UNICA – component T2.3.4 – metodologia Coste Alte). Tra le caratteristiche intrinseche della costa si considerano quelle geologico-geomorfologiche, climatiche, idrogeologiche e geotecniche. Tra i meccanismi responsabili dell'instabilità si considerano il moto ondoso, l'assetto geomeccanico, la variazione del livello del mare e della marea, eventi meteorologici (tra cui il vento), le acque sotterranee, le precipitazioni e l'effetto di alterazione provocato dallo spray marino. Sulla costa alta è importante inoltre studiare la conformazione delle superfici sommerse e le caratteristiche geologiche delle aree in prossimità delle falesie costiere, in quanto rivestono un ruolo fondamentale nella definizione dei processi di instabilità. In caso di fenomeni di scalzamento al piede, la presenza di infrastrutture quali strade, rilevati ferroviari, ecc, in prossimità della falesia risulta essere un ulteriore elemento di rischio.

B. Caratteristiche di moto ondoso e idrodinamiche

La conoscenza del moto ondoso in un determinato tratto di costa è fondamentale e richiede necessariamente un'analisi combinata di dati in situ e dati da modello. All'interno del quadro conoscitivo di base è opportuno effettuare una regionalizzazione delle onde e dei dati di idrodinamica a partire da modelli di previsione a grande scala opportunamente calibrati e validati con osservazioni di boe ondometriche, correntometri, mareografi.

La relazione contiene pertanto il quadro di tutti i dati disponibili atti a descrivere un'area ai fini della caratterizzazione del rischio a breve termine, anche ai fini della costruzione dei dati di input dei modelli di impatto delle onde e dell'idrodinamica costiera. La relazione inoltre segnala la presenza di eventuali gap conoscitivi che possono servire a indicare miglioramenti nei sistemi integrati di osservazione e previsione.

Di seguito si riportano delle schede che raccolgono sinteticamente le informazioni dette precedentemente, suddivise fra costa bassa e costa alta, e un esempio pratico per la sua compilazione.

COSTA BASSA	
Foto	
<i>Descrizione generale del sito</i>	
Trend evolutivo	Tasso medio di avanzamento o arretramento in m/anno.
Altezza massima spiaggia	
Larghezza media spiaggia	
Strutture di difesa	Indicare se sono presenti strutture di difesa e descriverle
Antropizzazione	Descrizione della spiaggia, se naturale, sito di interesse comunitario, pressione antropica
Distanza elementi dalla linea di riva	Inserire la distanza dalla linea di riva dei principali elementi che possono subire un danno dall'inondazione.
Corsi d'acqua	Indicare la presenza di foci fluviali e corsi d'acqua minori
Esposizione del sito e settore di traversia	
<i>Descrizione sintetica dei fattori di rischio a breve termine</i>	
Rischio da mareggiata	Descrivere a quali tipi di mareggiata l'area è esposta
Rischio da alluvionamento costiero	Descrivere se l'area è sottoposta a fenomeni di alluvionamento costiero anche per la combinazione tra piogge e mareggiate intense.
Rischio da rip currents	Descrivere se nell'area è presente questo tipo di rischio, con quali caratteristiche si presenta e se sono note le condizioni di innesco.
Rischio da maremoto	Descrivere se è nota (storicamente o da dati di evidenza scientifica) la presenza di rischi da maremoto per l'area.
Fenomeni storici e recenti	Fornire un quadro recente (anche utilizzando notizie di cronaca) relativo ai rischi da mareggiata evidenziati nell'area in tempi recenti.
<i>Caratteristiche geomorfologiche e sedimentologiche</i>	
DTM	Informazioni dati usati per la parte emersa e sommersa
Rugosità parte emersa	Informazioni sulla rugosità della parte emersa e sommersa con indicazione dei fattori di scabrezza associata
Batimetria	Tipo di dati usati, anno di riferimento
Forme di fondo	Al variare della batimetria
Pendenza fondali	
Duna	Presente o meno, indicare se è in erosione
Tipo di spiaggia e caratteristiche granulometriche	Sabbia/ghiaia/mista D50 [mm] in funzione della batimetria
Profondità di chiusura	[m]
<i>Moto ondoso e anemometria</i>	
Dataset	Indicare quali dati sono stati utilizzati e in base a quale metodologia (osservazioni, modelli) si è costruito il database costiero relativo al vento e alle onde, il numero di anni del dataset
Clima meteomarinò	Caratteristiche principali (rose delle onde, rose del vento,...) anche per stagione
Statistica degli estremi	Indicare quale metodologia è stata usata per la stima degli scenari di rischio
Run-up	Indicare come si è effettuata la stima del runup d'onda
<i>Caratteristiche idrodinamiche (correnti marine e livello del mare)</i>	
Dataset	Indicare quali dati sono stati utilizzati e in base a quale metodologia (osservazioni, modelli) si è costruito il database costiero relativo alle correnti e ai livelli, il numero di anni del dataset
Correnti	Descrizione delle correnti litoranee in funzione delle varie situazioni di vento e moto ondoso
Rip-current	Individuare e descrivere dove sono localizzate, se esistono evidenze e resoconti circa la loro presenza, osservazioni tramite webcam o altri strumenti, e se sono state studiate le condizioni di innesco
Livello del mare	Individuare sulla base di quali osservazioni e modelli vengono studiate le escursioni del livello del mare (a breve termine) nell'area, e come vengono valutati e separati gli effetti di : <ul style="list-style-type: none"> • Set-up d'onda • Set-up da vento • Marea astronomica • Marea barometrica
<i>Gap analysis</i>	

Gap del quadro conoscitivo	Indicare se le conoscenze di base relative all'area caratterizzata da costa bassa sono sufficienti o complete in relazione all'analisi di rischio a breve termine
Gap del sistema osservativo	Indicare se il sistema osservativo è sufficientemente rappresentativo delle caratteristiche meteomarine e idrodinamiche dell'area in relazione all'analisi dei rischi a breve termine
Gap del sistema previsionale	Indicare se il sistema previsionale è sufficientemente rappresentativo delle caratteristiche meteomarine e idrodinamiche dell'area in relazione all'analisi dei rischi a breve termine

COSTA ALTA	
Foto	
<i>Descrizione generale del sito</i>	
Trend evolutivo falesia	Indicazione dello stato della falesia.
Processi attivi	Descrizione di elementi instabili se presenti e del tipo di movimento
Infrastrutture	Descrizione e localizzazione delle infrastrutture presenti
Distanza dalla linea di riva	Inserire la distanza dalla linea di riva dei principali elementi che possono subire un danno in seguito all'eventuale frana di parti della falesia
Esposizione del sito e settore di traversia	
<i>Descrizione sintetica dei fattori di rischio a breve termine</i>	
Rischio da mareggiata	Descrivere a quali tipi di mareggiata l'area è esposta
Rischio da frana	Descrivere la presenza di rischi da crollo della falesia con particolare riferimento in seguito all'azione delle onde e dei frangenti, e se sono note le condizioni di innesco.
Rischio da maremoto	Descrivere se è nota (storicamente o da dati di evidenza scientifica) la presenza di rischi da maremoto per l'area.
Fenomeni storici e recenti	Fornire un quadro recente (anche utilizzando notizie di cronaca) relativo ai rischi da mareggiata evidenziati nell'area in tempi recenti.
<i>Caratteristiche geomorfologiche e litologiche</i>	
DTM	Informazioni dati usati per la parte emersa e sommersa
Batimetria	Tipo di dati usati, anno di riferimento
Pendenza fondali	
Esposizione e orientazione	
Litologia	Litotipo, stratificazione, giacitura ...
Geomorfologia	Processi e morfologia di erosione, alterazione e dissoluzione, processi di crollo,...
Strutture	Faglie, giaciture, ...
Geomeccanica	Fratturazione, coesione, resistenza a compressione, angolo di attrito, alterazione, granulometria...
Bacino idrografico e idrogeologico	Individuazione, descrizione della geometria della falda, permeabilità, infiltrazione, ...
Precipitazioni	
<i>Moto ondoso, anemometria e caratteristiche idrodinamiche</i>	
Dataset	Indicare quali dati sono stati utilizzati e in base a quale metodologia (osservazioni, modelli) si è costruito il database costiero relativo al vento, alle onde, alle correnti e ai livelli, e il numero di anni del dataset
Clima meteomarine	Caratteristiche principali (rose delle onde, rose del vento, ...) anche per stagione
Statistica degli estremi	Indicare quale metodologia è stata usata per la stima degli scenari di rischio
Livello del mare	Individuare sulla base di quali osservazioni e modelli vengono studiate le escursioni del livello del mare (a breve termine) nell'area, e come vengono valutati e separati gli effetti di : <ul style="list-style-type: none"> • Set-up d'onda • Set-up da vento • Marea astronomica • Marea barometrica
<i>Gap analysis</i>	
Gap del quadro conoscitivo	Indicare se le conoscenze di base relative all'area caratterizzata da costa alta sono sufficienti o complete in relazione all'analisi di rischio a breve termine

Gap del sistema osservativo	Indicare se il sistema osservativo è sufficientemente rappresentativo delle caratteristiche meteomarine e idrodinamiche dell'area in relazione all'analisi dei rischi a breve termine
Gap del sistema previsionale	Indicare se il sistema previsionale è sufficientemente rappresentativo delle caratteristiche meteomarine e idrodinamiche dell'area in relazione all'analisi dei rischi a breve termine

C. Esempio sito pilota tra Bocca di Magra e Marina di Massa

Il tratto di costa tra il Fiume Magra a Marina di Massa, scelto come uno dei siti pilota del progetto per testare le metodologie proposte in questo report, è un tratto di litorale lungo circa 12km, esposto principalmente agli eventi di Libeccio (Sud-Sud-Ovest).

Le caratteristiche del sito si trovano descritte nella relativa monografia (T2.6).

L'area in analisi è molto estesa e presenta caratteristiche diversificate, per cui si ritiene opportuno dividerla in tre parti:

- tratto 1: dalla foce del Fiume Magra alla foce del Torrente Parmignola (tratto Ligure)
- tratto 2: dalla foce del Torrente Parmignola al Porto di Carrara (tratto Toscano)
- tratto 3: dal Porto di Carrara a Marina di Massa (tratto Toscano)

LITORALE APUO VERSILIESE, TRATTO 1	
Foto	
<i>Descrizione generale del sito</i>	
Trend evolutivo	Avanzamento, tasso medio +0.6 m/anno
Altezza massima spiaggia	3 m slm
Larghezza media spiaggia	60 m
Strutture di difesa	10 pennelli emersi (lunghezza tot. 694 m) / 4 pennelli con prolungamento sommerso (721 m) / 1 scogliera parallela emersa (154 m) / 4 scogliere parallele sommerse (393 m) / 3 piattaforme isola (50 m) / 5 pennelli emersi (534 m)
Antropizzazione	Spiaggia con diversi stabilimenti balneari e caratterizzata da strada litoranea retrostante. Presenza di due piccoli centri abitati (Fiumaretta di Ameglia e Marinella di Sarzana).
Distanza elementi dalla linea di riva	Stabilimenti balneari posti sulla spiaggia, a pochi metri dalla riva. Alcune abitazioni e strutture turistiche sono poste tra il limite della spiaggia, ampia mediamente 60 m e la strada litoranea.
Corsi d'acqua	Foce del Fiume Magra al margine occidentale, e del Torrente Parmignola al margine orientale

	(confine regionale Liguria-Toscana)
Esposizione del sito e settore di traversia	Sito esposto prevalentemente ad eventi da Sud-Ovest (Libeccio)
<i>Descrizione sintetica dei fattori di rischio a breve termine</i>	
Rischio da mareggiata	L'area è esposta principalmente agli eventi da S-SW (libeccio) che si presenta con due fenomenologie principali : libeccio corto e libeccio lungo
Rischio da alluvionamento costiero	Il tipo di tempo associato al libeccio è lo stesso associato alle precipitazioni più intense lungo l'arco ligure, pertanto esiste una probabilità non trascurabile che il deflusso dei corsi d'acqua possa essere ostacolato dal livello del mare nei pressi della foce, causato dall'azione combinata di setup d'onda, setup da vento e bassa pressione atmosferica, eventualmente in fase con la marea astronomica.
Rischio da rip currents	Nell'area il rischio da rip current appare prevalentemente dovuto all'effetto prodotto dai pennelli e dalle celle di protezione lungo il litorale, che possono guidare le correnti di ritorno.
Rischio da maremoto	Non noti
Fenomeni storici e recenti	Ai fini conoscitivi si prevede di fare una ricerca storica di tutti gli eventi principali che hanno comportato rischi a breve termine, andando ad analizzare anche vecchi studi o informazioni giornalistiche. Alluvionamenti recenti nell'area sono avvenuti nell'ottobre 2011 e nel novembre 2014.
<i>Caratteristiche geomorfologiche e sedimentologiche</i>	
DTM	Rilievo spiaggia emersa risalente al maggio 2016 (Progetto CAMP)
Rugosità parte emersa	Saranno in parte dedotte a partire dalle formule di letteratura a partire dalle informazioni granulometriche e morfologiche disponibili, in parte ricavate per calibrazione dei modelli idrodinamici.
Batimetria	Rilievo spiaggia sommersa risalente al maggio 2016 (Progetto CAMP)
Forme di fondo	Isobate irregolari con barre festonate e truogoli nelle celle tra le opere di difesa.
Pendenza fondali	0,8%
Duna	Non presente
Tipo di spiaggia e caratteristiche granulometriche	Sabbia media e fine sulla spiaggia emersa. Da ghiaia a sabbia fine sulla spiaggia sommersa, con dimensioni medie decrescenti di 0,6 mm ogni metro di profondità
Profondità di chiusura (stima)	-9 m
<i>Moto ondoso e anemometria</i>	
Dataset	Si prevede di utilizzare i dati del modello di onda WWIII del Consorzio LaMMA (sia i dati archiviati dal modello operativo sia le rianalisi attualmente in corso), i dati di vento del Consorzio LaMMA, i dati della boa ondometrica di La Spezia (nel periodo funzionante), della boa di Gorgona e del correntometro/ondametro del Gombo.
Clima meteomarinò	L'area è caratterizzata soprattutto dalla presenza del SW (libeccio), che domina la gran parte degli eventi estremi. Le caratteristiche principali (rose delle onde, rose del vento,...) saranno elaborate anche per stagione sulla base dell'analisi dei dataset precedentemente citati.
Statistica degli estremi	Sarà svolta un'analisi degli estremi utilizzando distribuzione ai valori estremi (Gumbell, Weibull o generalizzata di Pareto) calcolando i valori ottenuti al variare del tempo di ritorno pari a 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 anni.
Run-up	Stima del runup d'onda ottenuta combinando: <ul style="list-style-type: none"> - formule empiriche - analisi di dati tramite un'implementazione del modello XBeach (1D e 2D) in modalità non stazionaria a partire dalla profondità di chiusura. Una volta noti i valori di run-up si otterranno le distanze massime e le mappe di pericolosità da inondazione secondo quanto indicato nella metodologia generale. - Analisi di dati webcam costiere ove disponibili
<i>Caratteristiche idrodinamiche (correnti marine e livello del mare)</i>	
Dataset	Si prevede di utilizzare i dati di corrente a scala regionale del modello ROMS del Consorzio LaMMA, i dati misurati dal del correntometro del Gombo, i dati dei mareografi di La Spezia e Livorno.
Correnti	L'analisi delle correnti litoranee in funzione delle varie situazioni di vento, moto ondoso e marea si svolgerà utilizzando il modello idrodinamico accoppiato Delft 3D – FLOW e WAVE
Rip-current	Tramite un approccio combinato tra modelli e osservazioni (webcam), ove disponibili, si individueranno le condizioni di potenziale innesco (in funzione di vento, moto ondoso a larga scala) e si costruirà una casistica di situazioni ricorrenti.
Livello del mare	Nel calcolo dei livelli saranno analizzati i quattro contributi dovuti a onda, vento, pressione, marea, separatamente. Il sovrizzo da vento e quello da pressione verranno calcolati a partire rispettivamente dai mareografi di La Spezia e Livorno in combinazione con le stime fornite dai modelli numerici di circolazione.
<i>Caratteristiche idrodinamiche (correnti marine e livello del mare)</i>	
Gap del quadro	Si ritiene che debbano essere studiate in dettaglio le condizioni di pericolosità associate al rischio da rip currents per l'area, e le situazioni di potenziale alluvionamento costiero. Queste

conoscitivo	condizioni non sono infatti note.
Gap del sistema osservativo	Nell'area manca un sistema osservativo soprattutto per la valutazione dell'impatto delle onde e dell'idrodinamica sul litorale. Si ritiene necessaria l'installazione di apposite webcam per calibrare e validare i modelli di rischio a breve termine.
Gap del sistema previsionale	Il sistema previsionale andrà completato con l'implementazione di modelli di impatto delle onde e di stima delle correnti (anche rip currents) a scala litoranea quali Delft-3D FM e XBeach.

IV. CONTENUTI TECNICI DEI SISTEMI DI PREVISIONE E ALLERTAMENTO

I sistemi di allertamento sono indispensabili per segnalare preventivamente la possibilità di verificarsi di eventi potenzialmente pericolosi per l'ambiente naturale, l'ambiente costruito, l'uomo, e quindi mettere in atto le necessarie misure preventive. Questi sistemi si basano sull'utilizzo di modelli numerici previsionali che però richiedono, a monte, una misura dell'affidabilità delle previsioni fornite. Questa può essere valutata solo per confronto con dati di osservazione.

Dai modelli meteorologici e dai modelli meteomarini a grande scala si ottengono rispettivamente le forzanti di vento e pressione e i parametri d'onda (altezza d'onda, periodo di picco, spettro d'onda, ...) da usare in input nei modelli di onda e idrodinamici ad alta risoluzione.

I modelli di onda e idrodinamici ad alta risoluzione forniscono rispettivamente le caratteristiche di moto ondoso (di una mareggiata o di un evento estremo con un certo tempo di ritorno) e livelli del mare (con il tempo di ritorno scelto) da usare in ingresso ai modelli a scala locale per la stima del run-up e quindi l'identificazione delle aree potenzialmente inondabili. Inoltre questi modelli permettono di analizzare la dinamica delle eventuali correnti di rip (molto pericolose per la vita umana).

A. Utilizzo dei dati previsionali a larga scala

Come detto in precedenza, i dati meteomarini lungo la costa, ai fini dell'allertamento della popolazione, possono anche essere utilizzati così come sono, cercando di dedurre livelli di rischio in relazione alla conoscenza del territorio. Questo comporta la necessità di avere previsori esperti in grado di valutare, sulla base delle conoscenze acquisite precedentemente, la potenziale ricaduta di un evento meteomarino sulla costa.

A titolo di esempio si riporta il caso discusso nel paragrafo I.B (evento del 23-25 maggio 2013). Le mappe previsionali relative all'evento fornivano, lungo la costa toscana, già a partire da alcuni giorni precedenti l'evento, una situazione caratterizzata da una vasta area depressionaria che interessava gran parte dell'Europa; tra il pomeriggio del 23 e la mattina del 24 il transito di un fronte freddo sulle regioni settentrionali italiane ha determinato il rapido approfondimento di un minimo depressionario sul Golfo Ligure (998 hPa) destinato a persistere fino al 25, seppure in graduale colmamento.

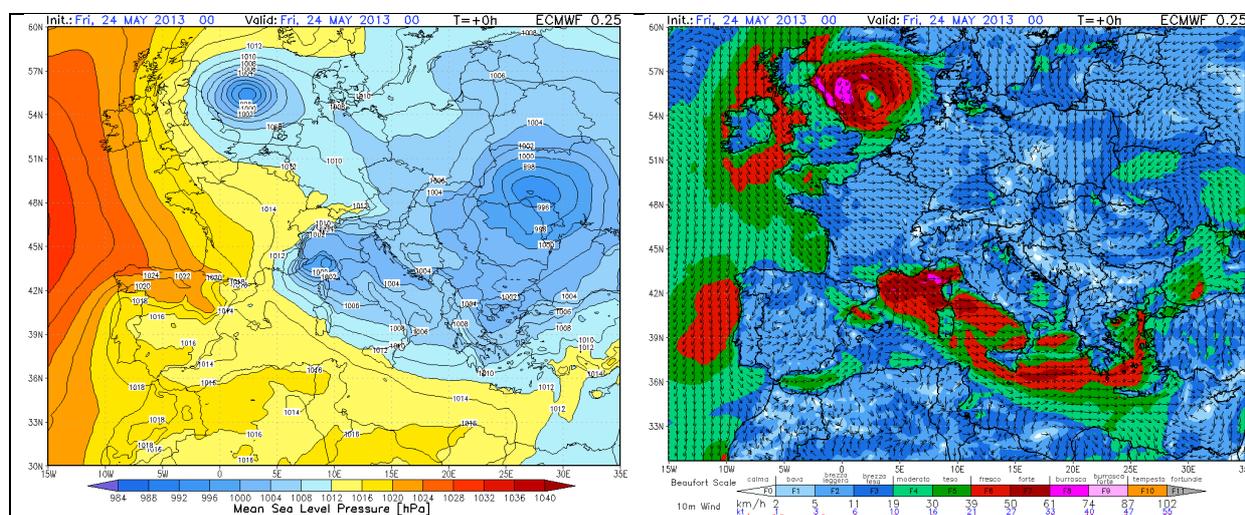


Figura 4 situazione sinottica del 24 maggio 2013 e relativa mappa di vento dell'ECMWF

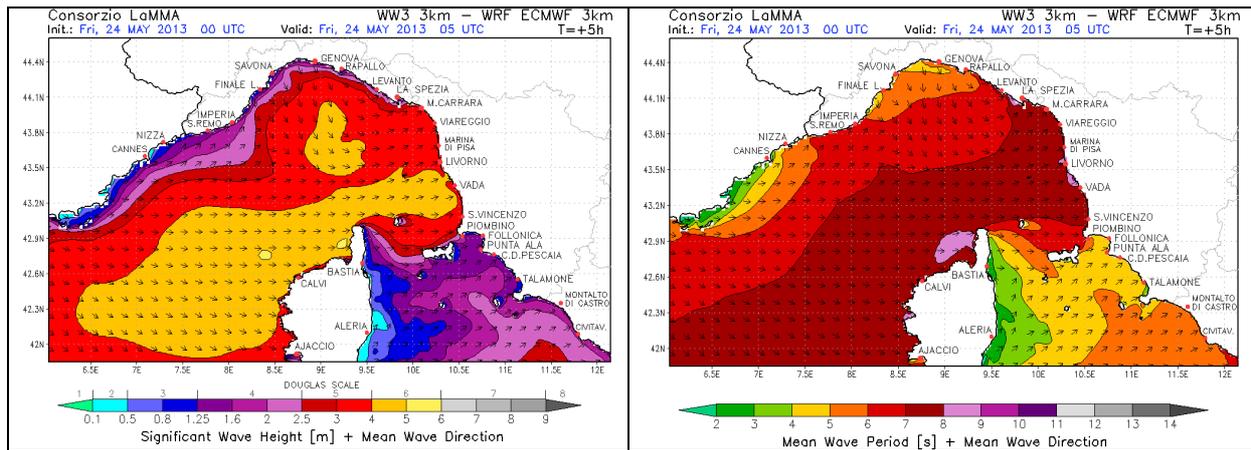


Figura 5 Modello LaMMA-WW3 di previsione delle onde a 3km per l'area Ligure e Nord Tirreno, valida per le ore 5 UTC del 24 maggio 2013. A sinistra, mappa di altezza d'onda significativa, a destra mappa del periodo medio delle onde.

Alcuni sistemi di allertamento presenti dello spazio di cooperazione sono elencati al paragrafo II.B.

Ai fini dell'implementazione di un sistema di previsione meteomarina, le caratteristiche rilevanti riguardano:

- l'estensione dell'area marina in esame, deve essere tale da raccogliere la totalità parte dei flussi di energia che contribuiscono all'agitazione ondosa lungo la costa. A scala del Mediterraneo Occidentale e delle coste dell'area marina transfrontaliera, nella valutazione dei flussi occorre estendere il modello di previsione delle onde a tutto il Mediterraneo Occidentale fino almeno a Gibilterra e, verso Est, includere una buona frazione del bacino ionico Est del canale di Sicilia;
- la risoluzione spaziale del modello deve tener conto della conformazione della costa e della presenza delle isole; a larga scala l'obiettivo minimo è quello di simulare le onde ad almeno $1/10^\circ$; alle scale di dettaglio (da simulare tramite modelli innestati o tramite aree a maggior risoluzione in modelli a maglia non strutturata) si ritiene che il target dovrebbe essere quello di una risoluzione costiera pari ad almeno 1 km o inferiore;
- la risoluzione spettrale del modello non dovrebbe essere superiore a 10° (risoluzione angolare) e includere non meno di 25-30 frequenze;
- la forzante di vento dovrebbe di preferenza provenire da un modello meteorologico ad area limitata, con risoluzione non superiore a $1/10^\circ$ su larga scala e preferibilmente non superiore a 3 km nei domini di maggior dettaglio. La frequenza temporale con cui passare i dati dal modello di previsione meteorologica al modello di previsione delle onde non deve essere superiore ad 1h.

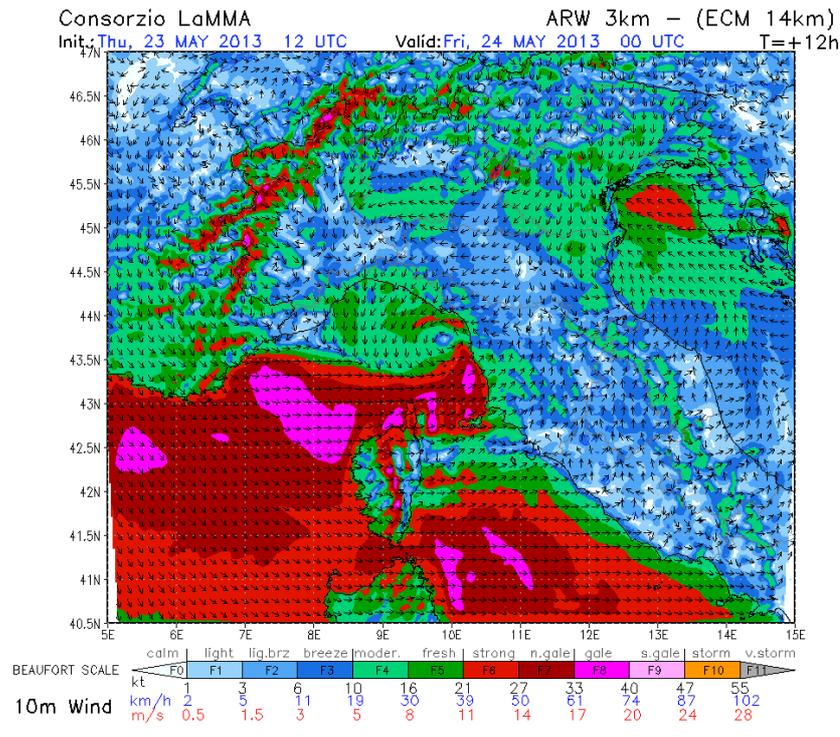


Figura 6 Modello LaMMA-WRF di previsione del vento a 3km per l'area Ligure e Nord Tirreno, valida per le ore 00 UTC del 24 maggio 2013.

Nel caso studio citato il Centro Funzionale Meteo-Idrologico-Idraulico della Regione Toscana ha emesso un avviso di criticità regionale con allerta moderata/arancione sulla costa, per la previsione di mare agitato a nord dell'isola d'Elba con mareggiate lungo le coste esposte.

Va sottolineato come l'impatto degli eventi, nelle procedure attuali, non viene valutato in base alla stagionalità dei fenomeni, ma sulla base di soglie definite a priori. Nel caso in esame, si sarebbe dovuta riconoscere l'eccellenza dell'evento in base al periodo dell'anno in cui questo si è manifestato.

AVVISO DI CRITICITÀ REGIONALE

Emesso **Giovedì, 23 Maggio 2013, ore 12.20**

Valido dalle ore **00.00** di **Venerdì, 24 Maggio 2013** alle ore **22.00** di **Sabato, 25 Maggio 2013**



- A1-Magra
- **A2-Versilia**
- A3-Serchio
- A4-BassoSerchio
- B1-Sieve
- B2-ValdMed
- B3-OmbroneBisen.
- B4-ValdInf
- B5-RenoSanterno
- **C1-Foce Arno**
- **C2-Cecina**
- **C3-Cornia**
- **C4-Isole**
- D1-Elsa
- D2-Era
- D3-OmbroneGR
- D4-GrevePesa
- E1-Casentino
- E2-Chiana
- E3-ValdSup
- E4-Tevere
- F1-Orcia
- F2-Bruna
- F3-Albegna
- F4-Fiora

Livello	Terminologia	Altezza Significativa Moto Ondoso (m)
0	fino a mosso	<1,25
1	molto mosso	1,25 - 2,5
2	agitato	2,5 - 4,0
3	molto agitato	4,0 - 6,0
4	grosso	> 6,0

CODICE COLORE MOTO ONDOSO

CODICE COLORE MOTO ONDOSO					
	<1,25	1,25 - 2,5	2,5 - 4,0	4,0 - 6,0	>6,0
Livello fenomeno	0	1	2	3	4

Figura 7 Livelli di allerta da mareggiata adottati presso la Regione Toscana ed esempio di avviso di criticità regionale emessa per il 24 maggio 2013.

Qualità dei modelli

È opportuno che i modelli di riferimento utilizzati a scopo previsionale siano stati calibrati e validati per un periodo di tempo sufficientemente lungo. In particolare, ai fini del loro utilizzo come strumento di allerta è opportuno che il modello sia in grado di rappresentare con buona approssimazione i picchi relativi alle mareggiate che accadono frequentemente nel corso dell'anno, e inoltre il comportamento stagionale delle mareggiate. Questa attività si può svolgere anche tramite analisi/reanalisi di periodi passati (hindcast).

I parametri statistici da valutare, nel confronto tra dati osservati e modelli, sono almeno: correlazione, deviazione standard, errore quadratico medio. Il confronto visivo tra dati simulati e dati misurati è comunque utile anche per capire eventuali sovrastime/sottostime nella valutazione di alcuni eventi specifici e comprenderne le cause.

Affidabilità delle previsioni

È anche necessario fornire una stima dell'affidabilità delle previsioni a più giorni, ovvero nei giorni e nelle ore precedenti un dato evento (es. 24 h, 48 h, 72 h, 96 h, 120 h). Come regola generale, più una previsione del tempo è vicina nel tempo, più è precisa. L'affidabilità previsionale nei modelli ad area limitata dipende da vari fattori, alcuni intrinseci, altri legati alla qualità dei dati iniziali e al contorno utilizzati nei modelli di previsione atmosferica.

B. Sistemi previsionali a scala locale

A scala locale, ovvero nella previsione dell'impatto degli eventi meteomarini lungo la costa, è necessario disporre di metodi efficaci per la valutazione operativa degli effetti delle onde sulla costa e, più in generale, dello stato del mare (inclusi i livelli e le correnti litoranee) sulla costa.

Rischio da mareggiata

La valutazione degli effetti a scala locale delle mareggiate si può determinare tramite un approccio basato su step successivi:

- 1) analisi dei dati meteomarini provenienti da un modello previsionale ad alta risoluzione costiera (< 1 km);
- 2) utilizzo dei dati precedenti in associazione ad una valutazione della pericolosità a scala locale derivante dalla stima dei tempi di ritorno dei singoli eventi. I tempi di ritorno non dovrebbero limitarsi a considerare l'altezza d'onda significativa come unico parametro, ma anche altri (lunghezza d'onda, periodo), finalizzati in particolare alla stima del runup e del setup sulla spiaggia. L'associazione di un tempo di ritorno ad ogni dato previsionale richiede pertanto una buona climatologia di base, particolarmente accurata per quanto riguarda la valutazione statistica relativa alla probabilità di occorrenza dei fenomeni estremi; inoltre richiede che lo studio sia condotto sulla base di metodi di analisi multivariata;
- 3) utilizzo di modelli complessi 2D e 3D, quali quelli descritti al paragrafo II.C (i.e. XBeach); la condizione al contorno offshore di questi modelli deve essere ricavata dai risultati dei modelli numerici di propagazione del moto ondoso a grande scala e quindi è possibile utilizzare modelli di dettaglio 1DH/2DH per stimare la risalita dell'onda in un tratto di spiaggia e per lo scenario di rischio analizzato; i modelli idrodinamici bidimensionali ad alta risoluzione possono servire a stimare la perimetrazione dell'area inondata;
- 4) utilizzo di metodi/modelli più semplici, basati sull'utilizzo di pochi parametri integrati (es. altezza d'onda, lunghezza d'onda, energia d'onda, pendenza della spiaggia ecc.), quali alcuni degli indici descritti al paragrafo II.F

Ognuno di questi approcci richiede una attenta validazione, sulla base di dati osservati nei siti pilota. Ai fini della validazione di quanto previsto come step 1, i dati di validazione a scala regionale e costiera sono costituiti prevalentemente da boe e ondometri. A scala locale possono essere molto importanti i dati di idonee webcam costiere, da cui è possibile ricavare dati di runup lungo la costa, ai fini della validazione degli step 2-4.

In alcuni siti pilota in cui è necessario uno studio approfondito delle condizioni di pericolosità, può anche essere opportuno un approccio misto, basato sulla considerazione temporanea di tutti gli step 1-4 e sull'implementazione di un sistema osservativo idoneo, prevedendo di utilizzare quanto previsto come step 3 eventualmente solo nella valutazione di situazioni particolarmente critiche, oppure per la validazione di metodologie semplificate.

Rischio da alluvionamento costiero

Il rischio da inondazione costiera per effetto combinato di una mareggiata, di un livello del mare sensibilmente più elevato e della piena di corsi d'acqua terrestri può essere determinato solo sulla base di un approccio molto

complesso in grado di valutare le risposte di tutte le componenti del sistema, come ad esempio un modello accoppiato atmosfera-onde-oceano in sinergia con modelli idrologici e idraulici dei bacini terrestri.

Un'ulteriore difficoltà è data dalla grande incertezza con cui è possibile stimare i campi di precipitazione, specie se in presenza di tempo marcatamente instabile.

Un supporto nella definizione di questi scenari di rischio può essere fornito dalla modellistica meteo-oceanografica ai fini di una miglior stima del livello del mare lungo la costa.

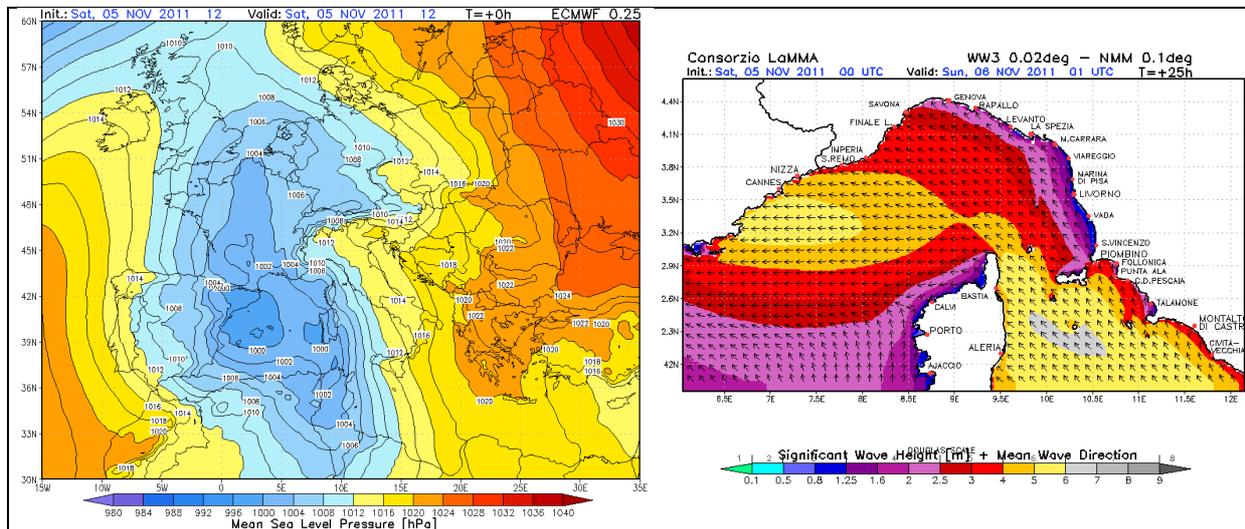


Figura 8 situazione sinottica del 5 Novembre 2011 e previsione di moto ondoso per le ore 01 UTC del 6 Novembre 2011.

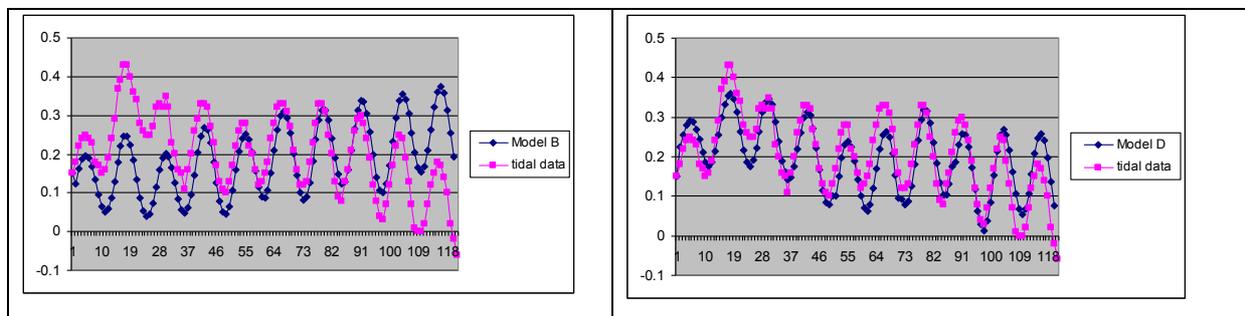


Figura 9 Esempio di confronto tra i dati di livello misurati in-situ e i dati di un modello di previsione. A sinistra, il modello tiene conto solo di marea astronomica e pressione atmosferica, a destra anche del setup da vento e di moto ondoso.

A titolo di esempio, nell'alluvione che ha investito Marina di Campo del 5-6 Novembre 2011, si è manifestato l'effetto concomitante di elevate precipitazioni a scala locale e di un intenso flusso di scirocco che ha investito, con imponenti mareggiate, la costa meridionale dell'Isola d'Elba. La registrazione del mareografo ha segnato livelli importanti (oltre 40 cm sopra il msl) che sono riproducibili da parte dei modelli solo attraverso la considerazione di tutti i contributi di rilievo (setup da vento, setup d'onda, effetto barometrico inverso e marea

Rischio da rip currents

Si tratta di un rischio difficilmente valutabile sulla base di modelli operativi a scala locale.

Il sito americano del National Weather Service (<https://www.weather.gov/>) fornisce una previsione operativa di questo fenomeno

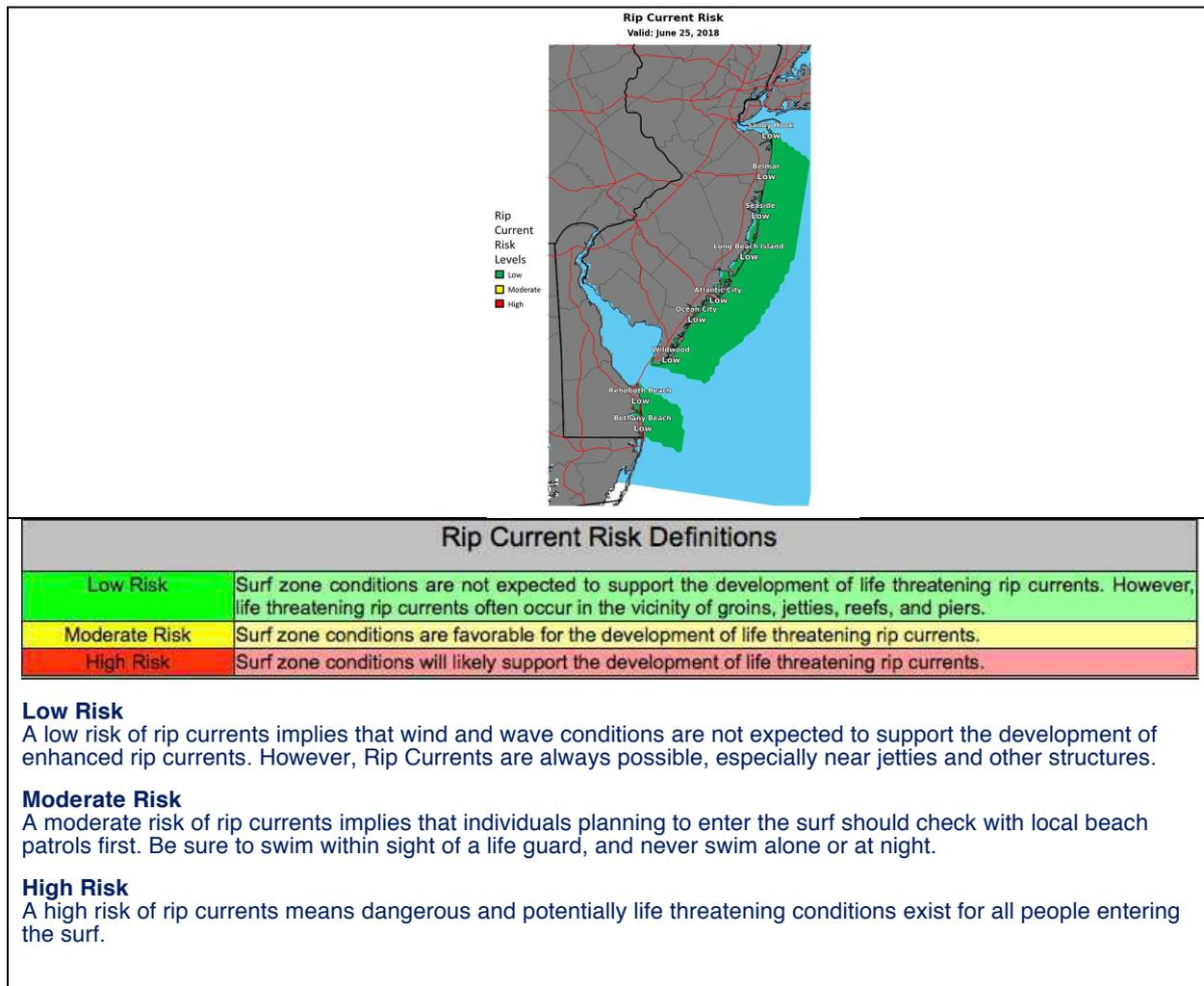


Figura 10 esempio di rip currents forecast tratto dal sito del National Weather Service.

Il rischio di rip currents è quindi associato a situazioni di vento e moto ondoso che, sulla base di un'analisi svolta a priori, sono più o meno favorevoli a supportare lo sviluppo di questo fenomeno.

Per determinare il rischio a scala locale di questo fenomeno, per tipologie di aree costiere e di situazioni descritte sinteticamente nel paragrafo I.C e in maggior dettaglio in Darlymple et al. (2011), si suggerisce anche in questo caso un approccio per step successivi:

- 1) utilizzo di modelli complessi 2D (ed eventualmente 3D) a scala locale, quali quelli descritti ai paragrafi II.D e II.C per simulare le condizioni di insorgenza di rip currents per un numero statisticamente rilevante di stati di mare (vento, moto ondoso); questo presuppone a priori una classificazione degli stati di mare seguendo un approccio di analisi delle componenti principali o similari (PCA – Principal Component Analysis, eventualmente classificazione spettrale); la risoluzione dei modelli costieri dovrà essere molto spinta (< 5 m) per tenere conto dei dettagli morfologici della costa e dei fondali e della presenza di strutture costiere, quali barriere e pennelli.
- 2) validazione dei dati sulla base di osservazioni costiere (es. correntometri in aree specifiche, quali varchi tra barriere emerse; analisi di immagini tramite tecniche idonee di processamento di dati di webcam costiere ad alta frequenza; analisi di dati radar ad alta risoluzione costiera quali radar in banda X);
- 3) utilizzo di metodi/modelli più semplici, basati sull'utilizzo di pochi parametri integrati (es. moto ondoso, vento, pendenza della spiaggia ecc.), per definire opportuni indici di rischio.

Si ritiene che uno studio a scala locale possa intanto essere condotto su un numero limitato di aree pilota per essere poi esteso a gran parte delle aree costiere di interesse.

C. Confronto osservazioni/modelli e stima dell'incertezza

Il confronto tra dati di modellazione e dati osservati nei punti in cui esistono strumenti di rilevazione (boe, correntometri/ondametri, webcam costiere, radar, ecc.) è fondamentale.

La previsione dei fenomeni costieri è affetta da incertezza, la calibrazione e validazione dei modelli numerici è necessaria per rendere le previsioni più affidabili.

In fase di calibrazione si selezionano alcuni parametri dei modelli (parametri numerici, risoluzione del modello, time-step...) e si fanno variare in un possibile range. I risultati (dati simulati) vengono poi confrontati con quelli misurati realmente da uno strumento (boa, correntometro, ...) utilizzando opportuni parametri statistici. Alla fine della fase di calibrazione viene quindi scelto un set ottimale di parametri che permettono ai risultati delle simulazioni di approssimare nel migliore dei modi i dati reali. Conclusa la calibrazione si procede alla validazione del modello verificando quanto si discostano i dati simulati con i dati misurati realmente *in situ*, sempre mediante parametri statistici.

V. SINTESI DELLA PROPOSTA METODOLOGICA

La definizione di metodi e modelli per la previsione e la gestione del rischio a breve termine comporta la realizzazione di studi sito-specifici nelle aree pilota di interesse, volti a descrivere il quadro conoscitivo in relazione a fenomeni specifici, lo stato dei sistemi di osservazione e previsione a scala regionale e costiera, e le analisi di eventuali gap. Questo studio può essere sintetizzato e guidato, negli aspetti salienti, tramite schede quali quelle proposte nel capitolo III.

In ogni caso, prima di costruire sistemi efficaci di supporto alle decisioni, si ritiene necessario svolgere indagini approfondite per evidenziare tutte le situazioni meteomarine che comportano potenziali rischi per l'ambiente naturale per quello costruito e per l'uomo, quali:

- l'analisi dei livelli di runup in seguito alle mareggiate;
- l'analisi combinata dei fenomeni di alluvionamento costiero e terrestre;
- l'analisi delle condizioni di potenziale innesco di rip currents;
- l'analisi delle condizioni di innesco di fenomeni franosi (nel caso di costa alta).

In questi casi andranno raccolte le informazioni necessarie all'implementazione di appositi sistemi di previsione e di allerta.

Questi sistemi si costruiscono seguendo alcune delle indicazioni fornite nel capitolo IV, e avendo come riferimento i modelli e i metodi descritti nel capitolo II.

In particolare

- 1) è necessario disporre di un sistema di osservazione e previsione integrata a scala regionale, per la previsione di onde, correnti e livello del mare;
- 2) è necessario disporre di sistemi di osservazione e previsione integrata a scala locale, per la previsione dell'impatto delle onde sulla costa, del livello del mare lungo la costa, e delle potenziali situazioni di potenziale pericolo determinate dall'idrodinamica costiera (rip currents);

I metodi proposti potranno essere preventivamente verificati in aree pilota.

L'integrazione tra osservazioni e previsioni è fondamentale ai fini di realizzare sistemi di previsione e allerta affidabili, a ridotta incertezza.

BIBLIOGRAFIA

- Regione Emilia Romagna. "La cartografia di pericolosità e rischio dell'ambito costiero". Servizio geologico sismico e dei suoli, 2014
- Armaroli C., Duo E., Validation of the Coastal storm Risk Assessment Framework along the Emilia-Romagna coast, *Coast. Eng.* (2017).
- Benassai, G., Aucelli, P., Budillon, G., De Stefano, M., Di Luccio, D., Di Paola, G., Montella, R., Mucerino, L., Sica, M., and Pennetta, M.: Rip current evidence by hydrodynamic simulations, bathymetric surveys and UAV observation, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, 1493–1503, 2017.
- Benassai G.. "Introduction to Coastal Dynamics and Shoreline Protection". WIT PRESS, 2006
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio Direzione Generale per la Difesa del Suolo. "Difesa delle coste e salvaguardia dei litorali. Analisi delle caratteristiche meteo-marine al largo e a riva e valutazione dei processi evolutivi costieri". Progetto Operativo Difesa Suolo, 2005
- Besio, G., Donini, L., Gallino, S. & Onorato, L (2015). A prompt index for sea storm hazards. 7th SCACR – Short Course and Conference on Applied Coastal Research, Florence, 28 September-01 October, 2015, 12 pp
- Booij, N., R. C. Ris and L. H. Holthuijsen, (1999), A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104, 7649-7666
- R.A. Dalrymple, J.H. MacMahan, Ad J.H.M. Reniers, V. Nelko, "Rip Currents," *Annual Reviews in Fluids Mechanics*, v.43 (2011), pp.551-581 <http://hdl.handle.net/10945/55138>
- Tom Bogaard, Simone De Kleermaeker, Wiebke S. Jaeger, Ap van Dongeren (2016). Development of Generic Tools for Coastal Early Warning and Decision Support. *E3S Web Conf.*, 7 18017
- Dawson, R.J., Dickson, M., Nicholls, R.J., Hall, J., Walkden, M.J.A., Stansby, P.K., Mokrech, M., Richards, J., Zhou, J., Milligan, J., Jordan, A., Pearson, S., Rees, J., Bates, P.D., Koukoulas, S., Watkinson, A., (2009). Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change. *Clim. Chang.* 95 (1–2), 249–288.
- De Angeli S., D'Andrea M., Cazzola G., Rebora N., Coastal Risk Assessment Framework: comparison of fluvial and marine inundation impacts in Bocca di Magra, Italy, *Coast. Eng.* (2017).
- DHI Italia. "Modelli numerici per l'ingegneria costiera". DHI TECHNICAL PAPER n°3
- Ferreira, O., Viavattene, C., Jimenez, J., Bole, A., Plomaritis, T., Costas, S., Smets, S., 2016. CRAF Phase 1, a framework to identify coastal hotspots to storm impacts. *E3S Web Conf.* 7, 11008.
- Flax, L.K., Jackson, R.W., Stein, D.N., (2002). Community vulnerability assessment tool methodology. *Nat. Hazards Rev.* 3, 163–176.
- Hills, Jack G. and Mader, Charles L. (1997). Tsunami Produced by the Impact of Small Asteroids; *Annals of the New York. Academy of Sciences.*
- MATTM, 2013. "Indirizzi operativi per l'attuazione della direttiva 2007/60/ce relativa alla valutazione ed alla gestione dei rischi da alluvioni con riferimento alla predisposizione delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni". http://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/vari/documento_definitivo_indirizzi_operativi_direttiva_alluvioni_gen_13.pdf
- Mokrech, Mustafa, Hanson, Susan, Nicholls, Robert J., Wolf, Judith, Walkden, Mike, Fontaine, Corentin, Nicholson-Cole, Sophie, Jude, Simon R., Leake, James, Stansby, Peter, Watkinson, Andrew R., Rounsevell, Mark D.A., Lowe, Jason A., Hall, Jim W. (2009). The Tyndall coastal simulator. *J. Coast. Conserv. Plan. Manag.*
- Roelvink JA, Reniers AJHM, van Dongeren AR, van Thiel de Vries JSM, McCall RT, Lescinski J. 2009. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coast. Eng.* 56:1133–52
- Schirmer, M., Schuchardt, B., Hahn, B., Bakkenist, S., Kraft, D., (2003). KRIM: Climate change risk construct and coastal defence. DEKLM German climate research programme. *Proceedings*, pp. 269–273.
- SØRENSEN, OLE R., et al. A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique. In: *Coastal Engineering 2004: (In 4 Volumes)*. 2005. p. 894-906.
- Torresan, S., Zabeo, A., Rizzi, J., Critto, A., Pizzol, L., Giove, S., Marcomini, A., (2010). Risks assessment and decision support tools for the integrated evaluation of climate change impacts on coastal zones. *International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environmental Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada.*
- Viavattene, C., Jiménez, J. A., Ferreira, O., Priest, S., Owen, D., & McCall, R. (2017). Selecting coastal hotspots to storm impacts at the regional scale: a Coastal Risk Assessment Framework. *Coastal Engineering*.

- Warrick, R.A., (2009). Using SimCLIM for modelling the impacts of climate extremes in a changing climate: a preliminary case study of household water harvesting in Southeast Queensland. 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia 13–17, July 2009.
- Zanuttigh, B., Simcic, D., Bagli, S., Bozzeda, F., Pietrantoni, L., Zagonari, F., ... & Nicholls, R. J. (2014). THESEUS decision support system for coastal risk management. *Coastal Engineering*, 87, 218-239.