

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL  
TERRITORIO**

*DICAM – Dipartimento di Ingegneria delle Civile, Ambientale e dei Materiali*

**TESI DI LAUREA IN**

**IDRAULICA MARITTIMA**

**Analisi e modellazione matematica  
della ingressione marina a Cesenatico**

**CANDIDATO:**  
Simona Berlini

**RELATORE:**  
Chiar.ma Prof.ssa Barbara Zanuttigh

**CO-RELATORE:**  
Dr. Ing. Andrea Natalia Raosa

Anno Accademico 2009-2010

Sessione II



# INDICE

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Idrodinamica costiera.....</b>	<b>7</b>
1.1 Il livello del mare.....	7
1.2 Le onde.....	9
1.3 Idrodinamica della zona dei frangenti.....	18
1.4 Erosione e trasporto solido.....	26
1.5 Opere di difesa del litorale.....	31
<b>2 Il rischio nelle aree costiere e il cambiamento climatico.....</b>	<b>37</b>
2.1 Analisi del rischio.....	37
2.1.1 Metodi in letteratura per mappe qualitative del rischio.....	39
2.1.2 Metodi di affidabilità di II° livello.....	43
2.1.3 Applicazione dei metodi qualitativi di letteratura.....	45
2.1.4 Mappe quantitative del rischio.....	50
2.2 Scenari di cambiamento climatico e conseguenze nelle aree costiere.....	54
2.3 Mitigazione del rischio: nuovi concetti integrati.....	56
2.3.1 Le “porte Vinciane” in Europa.....	56
2.3.2 Concetti integrati.....	61
<b>3 La costa dell’Emilia Romagna.....</b>	<b>65</b>
3.1 Clima del moto ondoso.....	65
3.2 Descrizione della morfologia della costa.....	68
3.3 Evoluzione della costa.....	70
3.3.1 Trasporto solido fluviale, erosione costiera, subsidenza ed eustatismo.....	70
3.3.2 Opere rigide di difesa dall’erosione.....	75
3.4 Vulnerabilità alla ingressione marina sul litorale Emiliano-Romagnolo.....	76
3.5 Il caso di Cesenatico.....	78
<b>4 La modellazione matematica bidimensionale.....</b>	<b>87</b>
4.1 Il modello numerico Mike21.....	88
4.2 Problematiche della modellazione numerica bidimensionale.....	91
4.3 Predisposizione dei dati e settaggio del modello.....	93
4.4 Scelta degli scenari di simulazione.....	100
4.5 Risultati.....	103

<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>121</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>123</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>125</b>

# INTRODUZIONE

Gli ambienti costieri soffrono di diverse problematiche che richiedono un attento studio essendo tali ambienti molto spesso sede di centri abitati o di aree produttive che devono necessariamente essere salvaguardate.

Tra queste problematiche le più importanti sono l'erosione e la vulnerabilità all'ingressione marina. Nel corso dei decenni, per limitare l'avanzamento erosivo si sono sviluppate svariate tecniche di difesa dei litorali, a partire dalle semplici barriere diffuse sin dal secolo scorso, fino ad arrivare ai nostri tempi con l'introduzione di sistemi meccanici di sbarramento dall'inondazione.

Sappiamo bene come il danneggiamento della costa porti a conseguenze più o meno gravi, in funzione delle perdite che si possono avere quando tratti di litorale vengono completamente erosi o quando interi centri abitati vengono invasi dall'inondazione del mare. Ciò porta alla necessità di ricercare soluzioni e metodi di previsione di cui le amministrazioni possano servirsi per poter attuare strategie di pianificazione e piani di emergenza da attivare nei casi più urgenti, finalizzati alla salvaguardia soprattutto delle vite umane.

L'elaborato di tesi di seguito presentato è teso ad effettuare un'analisi della problematica della vulnerabilità alla ingressione marina e dell'erosione concentrandosi in particolar modo sulla realtà della città di Cesenatico. Tale analisi muove i suoi passi in primo luogo dallo studio dei fenomeni idrodinamici caratterizzanti il litorale Emiliano-Romagnolo, per poi focalizzarsi sulle conseguenze che ciò comporta.

In questo contesto si colloca l'utilizzo di un modello matematico per fornire una risposta al problema, effettuando la simulazione di un evento di inondazione nella città stessa e verificare quali siano le aree esposte maggiormente all'ingressione.



# CAPITOLO 1

## Idrodinamica costiera

I fenomeni di erosione e inondazione che interessano le coste sono la conseguenza dell'azione del livello del mare sul territorio. La comprensione dell'idromorfodinamica costiera non può prescindere dalla conoscenza della variazione del livello del mare e della natura e della propagazione delle onde nonché dei fenomeni di trasporto solido .

### 1.1 Il livello del mare

Le maree sono un elemento dominante nel lungo periodo, essendo caratterizzate da periodi superiori ad un'ora; possono distinguersi in due principali categorie, a seconda delle cause che le generano:

- *maree astronomiche* (tide): dovute alla forza di attrazione tra Terra, Sole e Luna. L'attrazione con la Luna produce un innalzamento maggiore dell'attrazione con il Sole. Ogni punto sulla superficie terrestre è sottoposto alla stessa forza centrifuga, ma l'attrazione con la Luna cambia, essendo inversamente proporzionale alla distanza. Ciò porta al fenomeno dello schiacciamento del Geoide e all'innalzamento dei livelli marini. Inoltre queste maree variano nei loro livelli da giorno a giorno, a causa della differenza tra il piano dell'orbita lunare e quello equatoriale. Sono maree predicibili.

Le maree astronomiche si distinguono in (fig. 1): neap tide (quadratura) in cui la marea è minima perché i contributi attrattivi di Sole e Luna sono diretti in sensi opposti; spring tide in cui la marea è massima poiché i contributi sono diretti nello stesso senso.

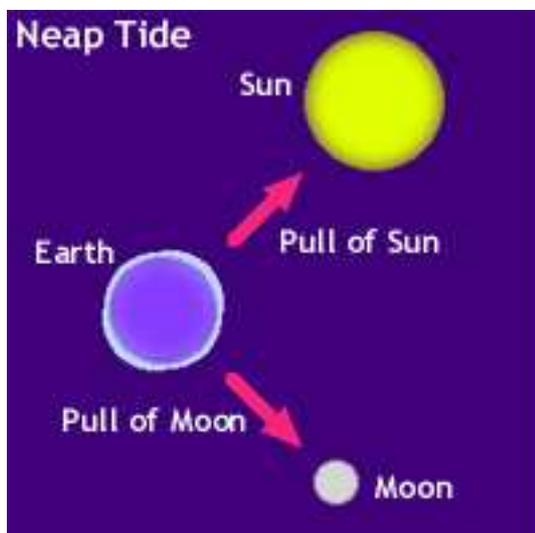




Fig. 1 Neap tide e spring tide

L'innalzamento della superficie libera si può descrivere tramite la teoria statica. Le ipotesi di partenza di questa teoria sono: acqua in equilibrio statico, ovvero non si tiene conto della deformazione del Geoide e delle forze di inerzia; superficie libera sotto l'azione del geopotenziale e delle forze mareali; superficie libera a pressione costante.

L'espressione a cui si perviene è la seguente:

$$\eta = -\frac{k}{g} = H \cdot \left( \cos^2 \alpha - \frac{1}{3} \right)$$

Dove  $k=a-c$ , cioè differenza tra attrazione dell'astro e forza centrifuga,  $g = GE/R^2$  in cui  $G$  = costante di gravitazione universale,  $E$  = massa della Terra,  $R$  = raggio.

Questa teoria non permette previsioni quantitative perché trascura: i vincoli imposti dalla Terra al moto dell'acqua, le forze di inerzia, le resistenze d'attrito, la deformazione del Geoide.

La marea astronomica si divide in quattro componenti: lunare, solare, diurna, semidiurna.

La marea è descritta dall'equazione di un oscillatore armonico semplice non smorzato del tipo:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega_n^2 y = A \cos \omega t$$

In cui:  $y$  = quota del mare,  $\omega_n$  = pulsazione propria del sistema,  $\omega$  = oscillazione del livello del medio mare,  $A$  = ampiezza delle oscillazioni locali all'istante  $t$ .

- *Maree meteorologiche* (surge): sono dovute alla pressione e alla tensione d'attrito del vento sulla superficie dell'acqua. Sono di difficile previsione.

Nell'analisi di questo tipo di marea si assume che il sistema abbia dinamica lineare e che quindi i fattori di pressione atmosferica e tensione d'attrito esercitata dal vento possano essere esaminati disgiuntamente e sempre sotto un'interpretazione statica del fenomeno mareale.

La risposta alle variazioni di pressione è:

$$\Delta\xi = -\frac{\Delta\rho_a}{\rho_w g}$$

Dove  $\rho_a$  = densità dell'aria,  $\rho_w$  = densità dell'acqua.

Mentre l'azione di tensione d'attrito esercitata dal vento si può scrivere come:

$$\tau_s = c_{10}\rho_a u_{10}^2$$

In cui:  $u_{10}$  = velocità del vento rilevata a 10 m da terra,  $c_{10} = 0.001(0.63 + 0.066u_{10})$  è il coefficiente d'attrito.

Si possono incontrare due diverse situazioni che originano condizioni diverse; se il vento soffia perpendicolarmente a riva si raggiungono condizioni di equilibrio in cui le tensioni di attrito sulla superficie e sul fondo sono bilanciate da un gradiente orizzontale delle pressioni e la superficie libera media dell'acqua assume una pendenza. Il vento trascina l'acqua in superficie verso la costa mentre, a regime, si determina una corrente compensativa al fondo cosicchè il trasporto totale verso riva è nullo.

Se invece il vento soffia parallelamente a riva, l'azione di trascinamento non può essere contrastata dalla pendenza della superficie libera media e viene assorbita da una componente trasversale della corrente a riva. Allora si crea una corrente lungo riva crescente nel tempo mentre la pendenza trasversale della costa si determina per effetto della forza di Coriolis che devia le masse. Allontanandosi da riva la corrente e la pendenza decrescono.

La misura del livello di marea può avvenire in due modi: tramite un mareografo installato su moli o nelle acque tranquille dei porti; oppure tramite gli ADCP, cioè Acoustic Doppler Current Profiler. Questi strumenti emettono onde acustiche che incontrando particelle in acqua vengono riflesse e tornano indietro all'emittente. Per effetto doppler il tempo che impiega l'onda a tornare indietro è proporzionale alla velocità delle particelle nella colonna d'acqua. Ciò che restituiscono è un profilo di velocità lungo la quota e un'indicazione delle intensità delle correnti.

## 1.2 Le onde

Le onde sono definite come forme che si muovono con una certa celerità.

Un'onda ha certe caratteristiche peculiari:

- la fase  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  ;
- la frequenza  $f=1/T$ ;
- la celerità  $c = \frac{L}{T} = \frac{2\pi}{T}$  ;
- la lunghezza d'onda L definita come la distanza tra due punti di uguale fase;
- il periodo T definito come l'intervallo di tempo che intercorre tra due punti di uguale fase.

Il comportamento delle onde viene studiato tramite la teoria lineare. Essa assume che il fluido sia un fluido perfetto, che sia incomprimibile e che si affetto da geopotenziale, portando quindi alla definizione di un campo di moto irrotazionale. Tale teoria porta alla fondamentale **relazione di dispersione**:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

Dove k è definito come 'numero d'onda' =  $2\pi/L$  e  $\omega$  è la pulsazione. La relazione di dispersione è fondamentale per legare il comportamento delle onde da fondali più profondi a fondali meno profondi.

I due scenari che si presentano analizzando la precedente espressione sono, appunto, quello di acque basse e di acque profonde e permettono di ricavare il valore della celerità d'onda.

In acque basse vale che  $\tanh(kh) = kh$  dunque ne viene che:

$$c = \frac{\omega}{k} = \sqrt{gh}$$

Grazie alle semplificazioni che si possono effettuare sulle funzioni iperboliche si può scrivere una relazione che rappresenti l'entità del fondale rapportata alla lunghezza d'onda, che nel caso di acque basse vale:

$$\frac{h}{L} < \frac{1}{20}$$

In acque profonde vale che  $\tanh(kh) \rightarrow 1$  quindi:

$$c_0 = \frac{\omega}{k} = \frac{gT}{2\pi} = 1.56T$$

Dove con  $c_0$  si rappresenta la celerità 'offshore', cioè al largo.

Dalla precedente relazione si evince che in acque profonde la celerità non dipende più dall'altezza del fondale ma dal periodo. Tale comportamento è valido quando:

$$\frac{h}{L} > \frac{1}{2}$$

Tra i due limiti di  $1/20$  e  $1/2$  ci troviamo nel campo di acque intermedie.

Rielaborando la relazione di dispersione possiamo giungere ad una nuova espressione che fornisca il legame tra il fondale scalato al largo e il fondale locale:

$$hk_0 = kh \tanh(kh)$$

In cui  $k_0$  è il numero d'onda al largo. Tramite questa relazione, se conosciamo le caratteristiche al largo possiamo risalire a  $k$  e capire cosa avviene a riva.

Le particelle di una colonna d'acqua descrivono delle orbite che secondo la teoria lineare sono chiuse. Questo è palesemente un limite della teoria stessa poiché, per potersi verificare la progressione delle onde, le orbite devono essere necessariamente aperte.

In ogni caso, in acque basse l'orbita è a forma ellittica, la cui dimensione verticale alla superficie libera corrisponde all'altezza d'onda  $H$  e la dimensione orizzontale è data da  $\frac{H}{\tanh(kh)}$ .

In acque profonde invece l'orbita è un cerchio (fig. 2).

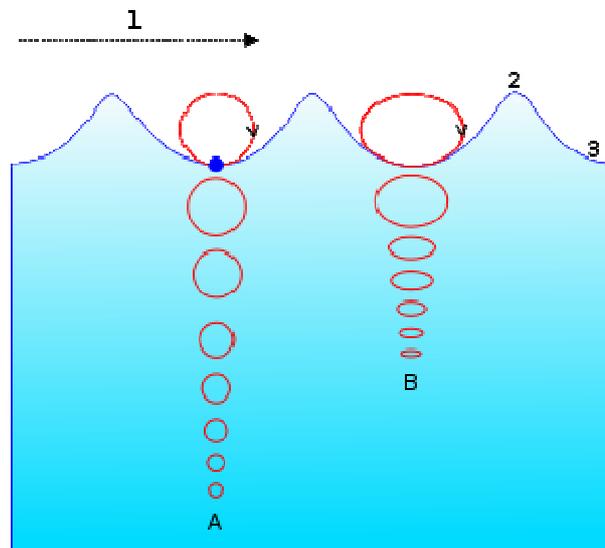


Fig. 2 Orbite descritte dalle particelle in acque profonde (A) e in acque basse (B). (Wikipedia.org)

Per quanto riguarda l'altezza d'onda, occorre tener presente che un'onda non può crescere indefinitamente; l'onda può essere stabile oppure rompersi in schizzi, a seconda che, rispettivamente:  $kh < 2$  oppure  $kh > 2$ .

Dunque la condizione di criticità si ha per:  $\frac{H}{L} = \frac{1}{\pi}$ . Tale condizione si può rendere più precisa introducendo la relazione di Miche e pervenendo alla seguente:

$$\frac{H}{L} \leq 0.14 \tanh(kh)$$

in cui si tiene conto del fondale effettivo e di quello infinito.

E' utile, poi, considerare il comportamento di gruppi di onde, in acque profonde e in acque basse.

La celerità di gruppo è definita come:

$$c_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}$$

In acque profonde vale la relazione:

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{g}{\omega} \quad c_g = \frac{g}{2\omega}$$

Da cui si deduce che l'onda singola viaggia più velocemente di un gruppo di onde.

In acque basse invece vale:

$$c = c_g = \sqrt{gh}$$

Ovvero che le onde singole e un gruppo di onde si muovono insieme, alla stessa velocità.

E' utile accennare al contenuto energetico di un'onda considerando che il muoversi delle singole particelle da un punto a quello successivo implica ovviamente la presenza di energia cinetica e di energia potenziale. L'energia totale posseduta dall'onda è la somma di entrambe le energie.

L'energia contenuta da un'onda di lunghezza L e larghezza unitaria è:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L$$

Considerando che quest'energia si propaga con una celerità di gruppo  $c_g$  il flusso di energia è descritto da:

$$U = E c_g = Enc$$

Dove n è il rapporto tra la celerità di gruppo e la celerità dell'onda :

$$n = \frac{c_g}{c}$$

Le onde si originano nella zona di *fetch*, cioè l'estensione della superficie su cui agisce il vento che genera le onde stesse. Questa zona è quella interessata dalla tempesta, dove il campo di onde è generalmente caotico e irregolare, in cui le onde vengono definite 'wind sea'. Successivamente si incontra una zona detta *di dispersione*, in cui le onde che si sono generate si disperdono in frequenza e direzione, abbassandosi le creste dell'onda e assumendo forme sempre più regolari. Qui le onde sono definite di tipo 'swell'.

Con l'avvicinarsi delle onde alla zona costiera, il fondale diminuisce progressivamente e la loro propagazione comincia a risentire di tale abbassamento. Ecco dunque che si entra nel campo delle acque basse e si incontrano diversi fenomeni dovuti alla propagazione dell'onda.

Il primo tra questi è lo **shoaling** (fig. 3); consiste nell'aumento di ripidità dell'onda dovuto alla diminuzione del fondale h.

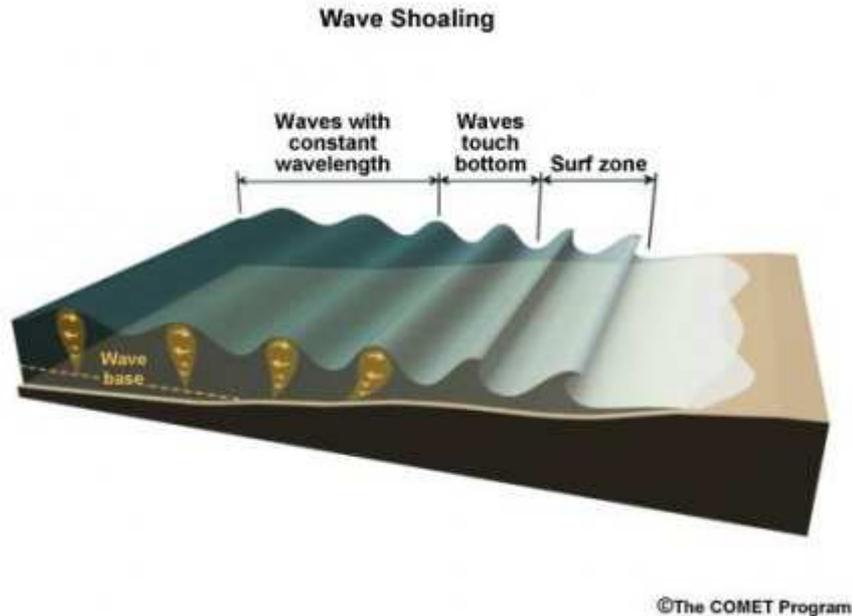


Fig. 3 Fenomeno dello shoaling. (www.meted.eucar.edu)

Nonostante tale diminuzione l'energia deve rimanere costante; per il bilancio energetico si consideri un volume di energia delimitato lateralmente da due raggi d'onda (cioè due normali alla cresta dell'onda) successivi e paralleli e da due piani normali alla direzione delle onde, e confinato superiormente dalla superficie d'acqua e inferiormente dal fondale. In assenza di generazione o dissipazione di energia ondosa, l'energia che entra nel volume considerato deve essere uguale all'energia che lo abbandona. Indicando con  $b$  la distanza tra i due raggi d'onda:

$$\begin{aligned}
 U_1 b &= U_0 b \\
 U_1 &= U_0 \\
 \frac{1}{8} \rho g H_1^2 n_1 c_1 &= \frac{1}{8} \rho g H_0^2 n_0 c_0
 \end{aligned}$$

Il pedice 0 indica le condizioni in acque profonde mentre il pedice 1 le condizioni in acque basse. Semplificando la precedente si ottiene:

$$\frac{H_1}{H_0} = \sqrt{\frac{c_0 n_0}{c_1 n_1}}$$

Poiché siamo in acque profonde,  $n_0$  vale  $1/2$  quindi risulta:

$$\frac{H_1}{H_0} = \sqrt{\frac{1c_0}{2c_1 n_1}} = k_{sh} = \text{coefficiente di shoaling}$$

Questo coefficiente evidenzia la variazione subita dall'altezza d'onda dovuta alla variazione della profondità d'acqua. A causa della presenza di una secca o di una riduzione del fondale, infatti, l'onda si irripidisce causando l'aumento del rapporto  $H/L$ ; ciò avviene ogni volta che un'onda abbandona le acque profonde per passare a quelle di transizione e arrivare poi alle acque basse.

Così come è appena stato ricavato, il coefficiente di shoaling si basa sulla conservazione dell'energia, ovvero può essere utilizzato solo nei casi in cui è assente una dissipazione energetica. Cioè si esclude che l'onda franga.

Si vede dall'ultima espressione che il coefficiente di shoaling è proporzionale alla radice del rapporto fra le celerità al largo e in acque basse, nonché alla radice del rapporto tra le corrispondenti celerità di gruppo:

$$k_{sh} \propto \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_{g1}}}$$

Si noti che, in corrispondenza della linea di riva, in cui la celerità singola  $c_1$  e quella di gruppo  $c_{g1}$  sono nulle, l'altezza d'onda tende all'infinito dunque la teoria lineare non è applicabile.

Il secondo fenomeno è quello della **rifrazione** (fig. 4): le creste delle onde ruotano e non si mantengono parallele alle batimetriche ma si propagano in direzione obliqua rispetto ad esse. Questo avviene quando le onde si avvicinano alla linea di costa, formando con essa un angolo che sia diverso da quello retto. La rotazione delle creste è dovuta principalmente a due fattori: il primo è l'attrito al fondo, che tende a essere più evidente al diminuire del fondale; il secondo è la variazione della celerità dell'onda associata alla variazione di profondità del fondale. Infatti si ricordi che in acque basse la celerità dell'onda è proporzionale alla profondità del fondale ( $c = \sqrt{gh}$ ).



Fig. 4 Fenomeno della rifrazione

La rifrazione è stata descritta ampiamente dalla legge di Snell.

Si immagini una brusca variazione di profondità del fondale, dunque due valori diversi delle celerità. In corrispondenza della brusca variazione si assiste alla deviazione della direzione delle onde, che creano dunque angoli diversi con la linea di variazione della profondità. La legge di Snell introduce una importante semplificazione:

vale solo per contorni dritti e paralleli. Secondo questa teoria, si perviene ad una relazione che lega l'obliquità delle onde alla celerità e al fondale, partendo sempre dalle ipotesi semplificative di moto irrotazionale e conservazione dell'energia:

$$\frac{\sin \alpha_1}{c_1} = \frac{\sin \alpha_0}{c_0}$$

Ovvero, in caso di ipotesi lineare, si conserva il rapporto tra l'obliquità e la celerità dell'onda nel passaggio da un fondale più profondo ad uno più basso.

Come eseguito per lo shoaling, anche per la rifrazione occorre fare un bilancio energetico. Si consideri un volume di energia delimitato lateralmente da due raggi d'onda successivi e da due piani normali alla direzione delle onde, e confinato superiormente dalla superficie d'acqua e inferiormente dal fondale. Si indichi con  $b_0$  e  $b_1$  la distanza tra i due raggi d'onda in acque profonde e in acque basse rispettivamente. Si può affermare che in assenza di generazione o dissipazione di energia ondosa, l'energia che entra nel volume considerato deve essere uguale all'energia che lo abbandona. Considerando il flusso di energia  $U$  si ottiene:

$$U_1 b_1 = U_0 b_0$$

$$\frac{1}{8} \rho g H_1^2 n_1 c_1 b_1 = \frac{1}{8} \rho g H_0^2 n_0 c_0 b_0$$

$$\frac{H_1}{H_0} = \sqrt{\frac{c_0 n_0}{c_1 n_1}} \sqrt{\frac{b_0}{b_1}} = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_{g1}}} \sqrt{\frac{b_0}{b_1}} = k_{sh} k_r$$

Si deduce che il coefficiente di rifrazione è pari a:

$$k_r = \sqrt{\frac{b_0}{b_1}}$$

Come prima accennato, questa soluzione vale per batimetrie abbastanza uniformi. Solitamente, tuttavia, soprattutto in prossimità della costa, i fondali presentano conformazioni piuttosto complicate, caratterizzate da diversi elementi di discontinuità come secche e canali. In questi casi la rifrazione si manifesta tramite un effetto di sparpagliamento dei raggi d'onda lungo i quali si propaga l'energia. Questo porta l'energia a concentrarsi in corrispondenza dei promontori e a disperdersi in corrispondenza delle baie. Ecco perché solitamente i promontori sono sottoposti a fenomeni di erosione mentre nelle baie si verifica il deposito dei sedimenti.

Il terzo fenomeno è quello della **diffrazione** (fig. 5); esso consiste nella dispersione dell'energia lungo direzioni perpendicolari alla direzione di propagazione di moto dell'onda e si verifica in corrispondenza di discontinuità geometriche (l'imboccatura di un porto, la presenza di barriere).

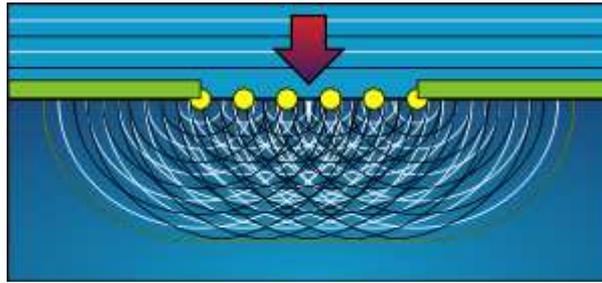


Fig. 5 Fenomeno della diffrazione

La diffrazione può venire intuitivamente "letta" come una richiesta di continuità da parte del fronte d'onda che subisce una discontinuità dal bordo (o dai bordi) di un ostacolo. Il risultato è che le onde entrano nella zona d'ombra dell'ostacolo creando delle geometrie circolari e diminuendo rapidamente la loro altezza mano a mano che si allontanano dall'ostacolo stesso.

Il quarto fenomeno che si presenta è quello della **riflessione**, che consiste nella riflessione di un'onda al momento del suo impatto con un ostacolo. Ad esempio, se un'onda impatta con una scogliera verticale impermeabile, essa riflette la totalità dell'onda, mentre se l'impatto avviene con una spiaggia di debole pendenza, la riflessione dell'onda sarà parziale.

Anche per la riflessione esiste un coefficiente che descriva l'entità della riflessione; esso è definito da:

$$K_R = \frac{H_r}{H_i}$$

Cioè dal rapporto tra l'onda riflessa e quella incidente.

Nel caso di onde completamente riflesse, la loro energia e il loro periodo coincidono con l'energia e il periodo dell'onda incidente, dicendo così che l'onda incidente e quella riflessa si trovano in fase.

L'ultimo fenomeno che si incontra è quello del **frangimento**. Al frangimento si arriva quando l'onda ha subito il suo processo di trasformazione nella propagazione da largo a riva. Con la diminuzione del fondale, infatti, la celerità diminuisce e le orbite percorse dalle singole particelle passano da circolari a ellittiche sempre più schiacciate. Nel momento in cui la velocità della singola particella supera la celerità dell'onda allora si ha il frangimento. Esso è il momento in cui si ha la massima dissipazione di energia, l'onda si rompe e la sua altezza diminuisce bruscamente. Il limite di stabilità dell'onda oltre cui si arriva poi al frangimento è :  $H > 0.88h$ , con  $H$  = altezza d'onda e  $h$  = fondale.

I frangenti possono essere di diverse tipologie a seconda del valore del parametro che li descrive, detto di Iribarren, definito come:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}}$$

Dove:

$\alpha$  = pendenza del fondale

$H/L$  = ripidità dell'onda

A seconda del valore del parametro i frangenti si possono distinguere in:

- *spilling* ( $\xi < 0.5$ ): è caratteristico delle spiagge poco ripide. Le onde cominciano a frangere ad una considerevole distanza dalla costa e si frangono gradualmente una volta raggiunte acque ancora più basse. Durante il frangimento, in corrispondenza della cresta si sviluppa una turbolenza che genera schiuma (fig. 6).



Fig. 6 Spilling. (beachsafe.org.au)

- *plunging* ( $0.5 < \xi < 3.3$ ): si verifica su spiagge di pendenza intermedia. L'onda prima di frangere si 'piega' su sé stessa, facendo cadere la cresta nel cavo, e diventando un'onda ideale per chi pratica il surf. Al momento del frangimento viene dissipata una grande quantità di energia di cui una gran parte prosegue verso la costa, generando alte onde, e la restante viene riflessa verso il largo (fig. 7).



Fig. 7 Plunging. ((beachsafe.org.au)

- *surging* ( $\xi > 3.3$ ): è il frangimento caratteristico delle spiagge molto ripide. Questo tipo di frangimento si verifica in una porzione di mare relativamente ristretta e la maggior parte dell'energia dissipata al frangimento viene riflessa verso largo. Prima che l'onda possa formare il tipo riccio sulla creste, il piede dell'onda raggiunge la costa impedendone l'evoluzione (fig. 8).



Fig. 8 Surging. (beachsafe.org.au)

### 1.3 Idrodinamica della zona dei frangenti

La zona in cui avviene la trasformazione dell'onda, dal frangimento fino all'arrivo a riva, è chiamata *surf-zone*, ovvero la zona compresa

tra la linea di riva e la profondità di chiusura. La profondità di chiusura è appunto la profondità del fondale in corrispondenza della quale l'onda comincia a frangere.

All'interno della surf-zone il fenomeno prevalente è il frangimento, che è descritto dall'*indice di frangimento* definito come:

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h}$$

ovvero il rapporto tra l'altezza d'onda al frangimento e il fondale.

La generazione e la propagazione delle onde è dovuta alla propagazione di energia e di quantità di moto. La variazione di quantità di moto agisce sul corpo d'acqua o generando inclinazioni del livello del mare o dando origine alle correnti. L'intensità di tali forze è trascurabile se ci si pone in condizioni di acque profonde mentre diventa rilevante nei processi che coinvolgono acque basse, in particolare appunto nella surf-zone dove possono causare ingenti variazioni di livello dell'acqua (set-up) e dare luogo a correnti importanti (come le correnti lungo riva). Il flusso della quantità di moto è detto *radiation stress*. Per capirne il significato fisico occorre approfondire un poco l'argomento.

Consideriamo la propagazione delle onde in acque basse; si indichi con  $H$  la distanza tra cavo e cresta dell'onda, con  $h$  la profondità del fondale locale, con  $D$  l'altezza del medio mare, con  $Z$  l'elevazione del mare riferito al fondale locale rispetto al medio mare, con  $\eta$  l'elevazione della cresta dell'onda rispetto al mare riferito al fondale locale.

Le equazioni di bilancio sono equazioni medie, cioè integrate sulla verticale e mediate nel tempo, e sono, rispettivamente, l'equazione di bilancio di massa e di quantità di moto:

$$\begin{cases} \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hU_i)}{\partial x_i} = 0 \\ \rho h \left( \frac{\partial}{\partial t} + U_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right) U_j + \rho g h \frac{\partial Z}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tilde{S}_{ij} + S'_{ij}) + \tau_i^B = 0 \end{cases}$$

dove:

$$hU_i = \left\langle \int_{-D}^{\zeta} u_i dz \right\rangle \text{ essendo } \zeta = Z + D, \text{ e } u \text{ la componente orizzontale locale}$$

di velocità.

Nella seconda equazione compaiono:

- la derivata totale della velocità  $\frac{DU_i}{Dx_i} = \left( \frac{\partial}{\partial t} + U_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right) U_j$ ;
- il termine di pressione  $\rho g h \frac{\partial Z}{\partial x_i}$ ;
- il radiation stress  $\tilde{S}_{ij}$ ;
- il termine di Reynolds  $S'_{ij}$ ;
- il termine di attrito al fondo  $\tau_i^B$ .

In un sistema di riferimento in cui la velocità media è nulla, cioè in cui sia valida la teoria lineare, il flusso di massa e la velocità media di una particella posta sott'acqua sono nulli; differiscono da zero solo tra cavo e cresta dell'onda, raggiungendo un massimo in corrispondenza della superficie libera. Per questo sistema di riferimento, l'energia ondosa  $E$  si scrive come somma di energia potenziale e cinetica, che si esprimono rispettivamente con le seguenti espressioni:

$$E_p = \rho g \left\langle \int_z^\xi z dz \right\rangle = \frac{1}{2} \rho g \langle \eta^2 \rangle = \frac{1}{4} \rho g a^2$$

$$E_c = \frac{\rho}{2} \left\langle \int_{-D}^\xi u^2 dz \right\rangle = \frac{\rho}{2} \left\langle \int_{-D}^z u^2 dz \right\rangle = \frac{1}{4} \rho g a^2$$

Essendo  $a$  il raggio dell'orbita percorsa da una particella, e dunque corrispondente a  $H/2$ . Dalla somma delle due espressioni si ottiene:

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{2} \rho g a^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

La variazione media del flusso di energia è:

$$F_i = \left\langle \int_{-D}^\xi u_i \left( p + \frac{\rho}{2} u_j u_j \right) dz \right\rangle = \frac{1}{2} \rho g a^2 \frac{\omega}{2k} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(kh)} \right) l_i = E c_g l_i$$

Avendo indicato con  $p = \frac{1}{2} \rho g \langle \eta^2 \rangle$ , con  $\omega$  la velocità angolare di una particella, con  $k$  il numero d'onda e con  $l$  la direzione di propagazione dell'onda.

Il radiation stress è:

$$S_{ij} = \left\langle \int_{-D}^\xi p dz \right\rangle \delta_{ij} + \left\langle \int_{-D}^\xi \rho u_j u_j dz \right\rangle \cong \frac{E}{2} \left[ \left( 2 \frac{c_g}{c} - 1 \right) \delta_{ij} + 2 \frac{c_g}{c} l_i l_j \right]$$

Dove il primo termine, isotropo, rappresenta la pressione d'onda mentre il secondo rappresenta il flusso lungo la direzione di propagazione dell'onda.

Ricordandosi che in acque basse vale che  $c_g \approx c$ , allora si ricavano i due diversi valori del radiation stress nella direzione di propagazione dell'onda e nella direzione ortogonale alla propagazione, rispettivamente definiti come:

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{3}{2} E$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} E$$

Parallelamente alla dissipazione di energia ondosa nella surf-zone si verifica una diminuzione del radiation stress o rilascio di quantità di moto.

Si possono incontrare due casi differenti: il caso in cui le onde incidono perpendicolarmente la spiaggia e il caso in cui le onde sono oblique rispetto alla spiaggia.

Nel primo caso la diminuzione del radiation stress è completamente bilanciata da un incremento del livello del medio mare. Questo fenomeno prende il nome di *wave set-up* (fig. 9).

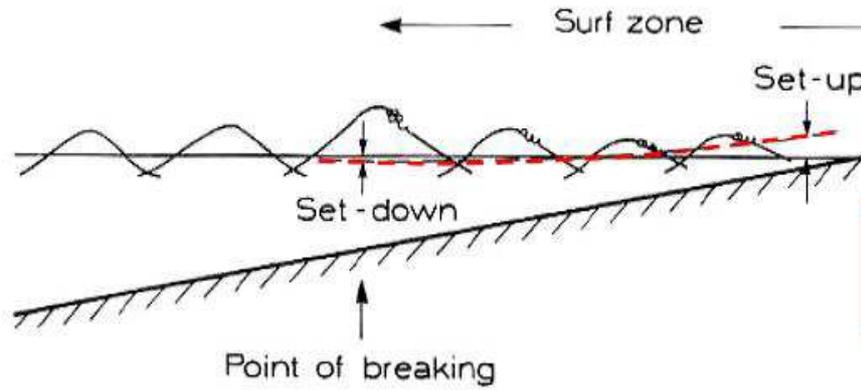


Fig 9 Wave set-up

Se si considera una spiaggia uniforme, cioè non ci sono variazioni rispetto alla variabile  $y$  (dunque  $\frac{\partial}{\partial y} = 0$ ), un moto stazionario (dunque

$\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ), e si trascura l'attrito al fondo poiché il fluido è ideale,

l'equazione di bilancio della quantità di moto sviluppata lungo le due direzioni  $x$  e  $y$  diventa:

$$\rho h \left( U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + \rho g h \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{S}_{xx} + S'_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tilde{S}_{xy} + S'_{xy}) + \tau_x = 0$$

E si semplifica tenendo conto delle precedenti assunzioni e del fatto che, poiché si considerano sempre componenti lungo la verticale,

l'integrale della velocità lungo  $x$  è nullo, ovvero:  $U_x = \left\langle \int_{-D}^{\xi} u_x dz \right\rangle \approx 0$ .

Altrimenti avrei un accumulo verso riva.

Dunque l'equazione di bilancio si semplifica notevolmente e diventa:

$$\rho g h \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{S}_{xx}}{\partial x} = 0$$

Tale equazione esprime l'evoluzione del livello medio del mare nella surf-zone.

Se valgono le seguenti ipotesi:

- assenza di dissipazione di energia al largo della linea di frangimento;
- indice di frangimento costante nella zona dei frangenti, cioè  $H = \gamma h$ ;
- validità della teoria lineare
- applicabilità della condizione alle acque basse nella zona di frangimento

allora il radiation stress lungo la direzione  $x$ , cioè normale alla costa, si scrive come segue:

$$\tilde{S}_{xx} = \left( 2 \frac{c_g}{c} - \frac{1}{2} \right) E$$

Che diventa, in acque basse:

$$\tilde{S}_{xx} = \frac{3}{2} E = \frac{3}{16} \gamma_b^2 h^2 \rho g$$

Dunque, l'equazione di bilancio della quantità di moto, sostituendo i termini appena esplicitati, assume questa forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{3}{16} \rho g \gamma_b^2 h^2 \right) + \rho g h \frac{\partial Z}{\partial x} = 0$$

$$\frac{3}{16} \rho g \gamma_b^2 2h \frac{\partial h}{\partial x} + \rho g h \frac{\partial Z}{\partial x} = 0$$

$$\frac{3}{8} \gamma_b^2 \frac{\partial(Z+D)}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial x} = 0$$

Z è la sopraelevazione del pelo libero dovuta al frangimento dell'onda, ed è appunto il wave set-up.

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{-\frac{3}{8} \gamma_b^2}{1 + \frac{3}{8} \gamma_b^2} \frac{\partial D}{\partial x}$$

Si può poi integrare la precedente per ottenere Z. Il massimo set-up è definito circa come  $Z = 10\% H_b$ .

Il set-up è un fenomeno legato alle onde medie; quando arriva un'onda più alta della media si verifica uno squilibrio tra la spinta idrodinamica dell'onda e il gradiente delle pressioni tale da accelerare le masse verso riva. Quando, invece, arriva un'onda più bassa della media la spinta idrodinamica non bilancia il gradiente delle pressioni e le masse si spostano verso il largo. Ecco che nascono delle oscillazioni di lungo periodo (5-6 periodi d'onda) dette "surf-beats" che possono generare risonanza nei porti e effetti nelle prove di laboratorio.

Il set-up presenta un andamento delle tensioni in senso opposto rispetto alle tensioni dovute al radiation stress, cioè presenta tensioni dirette verso largo che variano linearmente con la profondità. Quindi, spostandosi verso il fondo, si osserva che la tensione verso riva viene progressivamente bilanciata dal set-up. Il risultato tra la combinazione del radiation stress con le tensioni dovute al set-up è una corrente diretta verso riva con intensità delle pressioni decrescente allontanandosi dalla superficie del mare (vedi fig. 10).

Questa corrente deve essere necessariamente bilanciata da un'altra diretta verso il largo, denominata corrente di *undertow*.

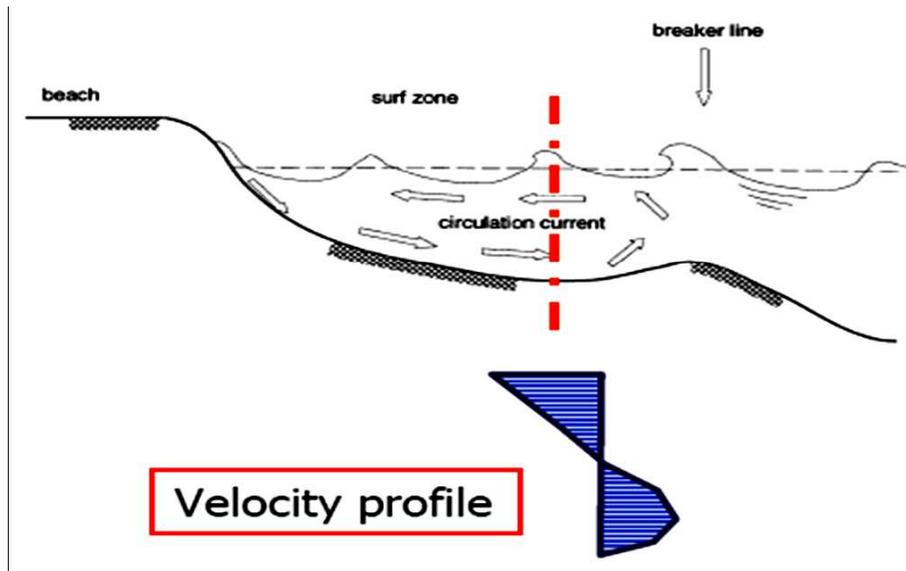


Fig. 10 Profilo di velocità

Dunque la corrente di undertow altro non è che una corrente di risucchio al fondo che compensa il trasporto di massa verso riva dovuto al frangimento dell'onda. Essendo una corrente di risucchio, può quindi rappresentare un pericolo per la balneazione.

Il secondo caso in cui ci si pone è quello di onde che incidono sulla spiaggia con una certa obliquità.

Quando le onde incidono obliquamente sulla costa, oltre alla componente  $\tilde{S}_{xx}$  del radiation stress normale alla spiaggia – che viene sempre bilanciata dal set-up e dalla corrente di undertow – esiste anche la componente di taglio  $\tilde{S}_{xy}$ . Essa è diretta parallelamente alla costa e non può dunque essere bilanciata dal set-up, originando allora delle correnti dette *longshore currents*, di cui si parlerà più avanti.

Le assunzioni per lo studio di questa situazione sono le stesse della precedente. Qui, però, l'equazione di bilancio della quantità di moto diventa:

$$\rho h \left( U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) + \rho g h \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{S}_{xy} + S'_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tilde{S}_{yy} + S'_{yy}) + \tau_y = 0$$

Tenendo sempre conto della distribuzione uniforme delle velocità lungo la verticale, la precedente equazione si può ridurre, come prima, alla seguente:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\tilde{S}_{xy} + S'_{xy}) + \tau_y = 0$$

Indicando con  $v_e \rho h \frac{\partial U_y}{\partial x} = S'_{xy}$ , l'equazione diventa:

$$\frac{\partial \tilde{S}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_e \rho h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \tau_y^B = 0$$

Ricordando che il termine non isotropo del radiation stress si scrive così:

$$\tilde{S}_{xy} = E \frac{c_g}{c} \cos \beta \sin \beta$$

dove  $\beta$  è l'obliquità dell'onda rispetto alla spiaggia, allora otteniamo:

$$\frac{\partial \tilde{S}_{xy}}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho g H^2}{8} c_g \cos \beta \right) \frac{\sin \beta}{c}$$

La quantità  $\frac{\sin \beta}{c}$  è costante: se varia il fondale l'onda ruota;  $\cos \beta = 1$

perché si considerano obliquità modeste e si ricordi che  $c_g = \frac{1}{2}c$  per

acque profonde. Se sviluppiamo la precedente otteniamo:

$$\frac{\partial \tilde{S}_{xy}}{\partial x} = -\frac{5}{16} \gamma^2 \rho \frac{\sin \beta}{c} (gh)^{3/2} \frac{dh}{dx}$$

Per date condizioni al largo, la velocità cresce proporzionalmente al fondale dalla linea di riva a quella di frangimento ed è zero al largo dei frangenti.

La discontinuità nell'intensità della corrente lungo riva al frangimento rende essenziale in questa zona la rappresentazione della viscosità turbolenta:

$$v_e = Nx \sqrt{gh}$$

che si assume proporzionale alla velocità orbitale  $N$  delle onde frangenti, alla distanza dalla linea di riva  $x$  e al fondale.

La corrente, dunque, ha un massimo compreso tra la zona dei frangenti e la riva e poi tende a tornare a zero.

Le correnti che si instaurano possono essere sostanzialmente di due tipologie: correnti lungo riva e correnti di ritorno.

Le correnti lungo riva (*long-shore currents*) si manifestano soprattutto in presenza di onde oblique e si estendono per l'intera larghezza della surf zone. Raggiungono la massima intensità nel mezzo della surf zone per poi decrescere nello spostarsi verso il largo. Onde più larghe generano correnti lungo riva più veloci, così come onde inclinate di  $45^\circ$  rispetto alle batimetriche generano correnti più veloci. Per diverse inclinazioni la velocità è calante e le onde ruotano nell'avvicinarsi a riva.

Le correnti di ritorno (*rip-currents*) sono correnti che assumono la forma somigliante a quella di getti di acqua, dirette dalla riva verso il largo, oltre la linea dei frangenti (fig. 11).

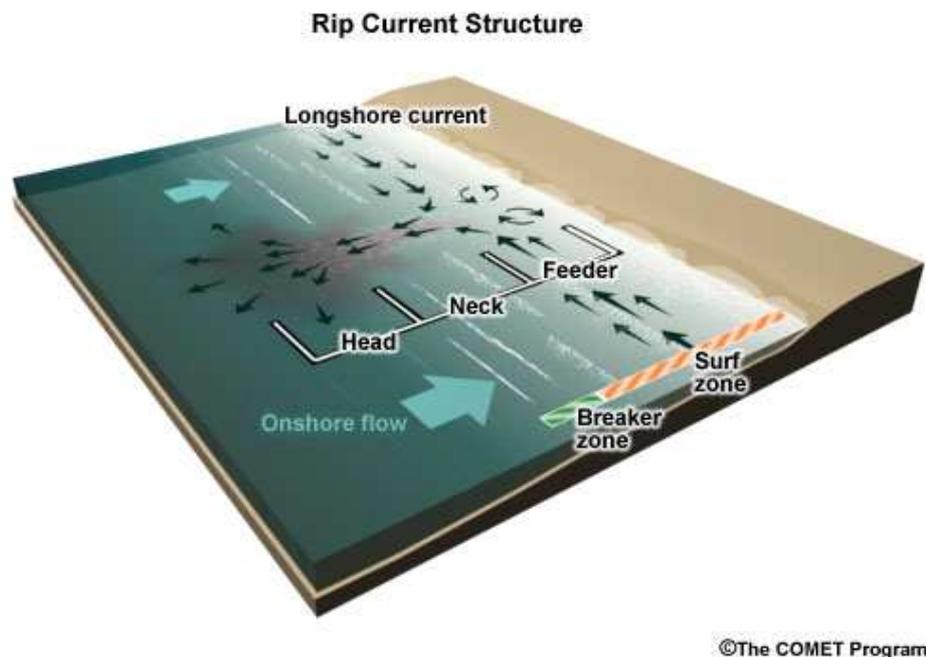


Fig. 11 Rip-currents. (www.meted.eucar.eu)

Le cause delle correnti di ritorno possono essere diverse:

- naturale variabilità delle altezze dei frangenti;
- ritorno verso largo attraverso canali creati nelle barre di fondo;
- interazione delle correnti lungo riva con strutture.

Tali correnti si possono notare da:

- diverso colore dell'acqua causato dai sedimenti portati in sospensione dalle rip-current che tipicamente sono di forte intensità;
- presenza di una linea di schiuma o di alghe.

Il motivo per cui si tende a prestare molta attenzione alle correnti di ritorno è che sono considerate molto pericolose poiché sono dotate di elevate velocità (0,5-2,5 m/s), si generano improvvisamente e sono correnti pulsanti.

Poiché le correnti di ritorno sono intense, l'onda frangendo porta in sospensione i sedimenti che poi la rip-current trascina verso il largo; quindi le correnti di ritorno hanno un forte potere erosivo.

Riassumendo, è importante l'obliquità con cui le onde incidono la spiaggia: quando tale angolo è modesto allora è probabile che si originino le rip-currents. E' importante, inoltre, la presenza di un'opera perpendicolare alla costa, come i pennelli; in questo caso l'onda impatta contro l'opera e si ha un rilascio locale di quantità di moto e si genera una corrente che interferisce con la corrente lungo riva. Un altro parametro che interessa è l'inclinazione della spiaggia: se il fondale risale dolcemente la zona dei frangenti è ampia perché le onde non frangono tutte insieme dunque il rilascio di quantità di moto è graduale. Quindi se la surf zone è più estesa lo è anche la zona di rip.

Quando invece la spiaggia è molto ripida la zona di surf è molto limitata quindi le rip che si vengono a generare sono più piccole in estensione, ma non in intensità.

Le correnti di ritorno si formano anche in presenza delle cosiddette "cusped beach", cioè in presenza di una linea di riva sinusoidale. In

corrispondenza delle baie, infatti, le correnti long-shore interagiscono e le onde tendono a concentrarsi nelle cuspidi e a ruotare verso le baie.

La geometria delle spiagge è tale per cui le correnti tendono a incontrarsi nelle baie, dove avviene rimescolamento e si generano le rip-currents.

La presenza di una singola cella di rip può verificarsi solo in prossimità di pontili o strutture. Celle multiple si formano quando una corrente si dissipa nelle vicinanze e quindi un'altra si genera. Oppure quando esistono più varchi nelle barre del fondale.

L'intensità delle rip si può stimare in base alla loro spaziatura lungo la spiaggia. Una singola corrente di rip in una zona di data altezza d'onda indica generalmente un'elevata velocità verso largo. Correnti multiple nella stessa area hanno minore velocità. Tanto maggiore è lo spazio tra le correnti di rip su una stessa spiaggia tanto maggiore è la velocità che può caratterizzare la corrente.

#### **1.4 Erosione e trasporto solido**

I fenomeni di erosione e trasporto solido interessano ai fini del nostro studio perché ci aiutano a comprendere la dinamica di rimodellamento del profilo della costa sia in situazioni di calma che in situazioni di mareggiata. Il profilo di una spiaggia è il risultato nel lungo periodo del materiale che è stato depositato durante la sedimentazione meno quello che è stato asportato a causa dell'erosione. Quando, in una spiaggia i volumi di materiale eroso e quelli di sedimento depositato si equivalgono si forma un andamento del fondale detto profilo di equilibrio.

La formazione di profili diversi comporta diverse condizioni di risalita dell'acqua a riva (run-up) che possono dunque condizionare anche i fenomeni di inondazione.

Il trasporto è prodotto dalla variazione della linea di riva o da accumuli dovuti alle correnti. Le cause che inducono il trasporto sono generalmente: le onde, che mobilizzano e portano in sospensione i sedimenti e le correnti, che trasportano i sedimenti fino a notevoli distanze dal punto di distacco.

Il trasporto solido può avvenire o lungo riva oppure perpendicolarmente a riva.

Il trasporto solido long-shore si propaga parallelamente alla costa ed è causato dalla generazione di una corrente (long-shore current) che si trasmette sempre parallela alla riva ed è guidata dalle variazioni della componente  $\tilde{S}_{xy}$  del radiation stress, tipico di onde che incidono obliquamente sulla spiaggia. I gradienti in questo tipo di trasporto producono dell'erosione sistematica (gradienti positivi) o della sedimentazione lungo la linea di costa (gradienti negativi).

I gradienti nel trasporto solido lungo riva possono essere causati da: onde incidenti con una certa obliquità, differenze nelle altezze d'onda lungo la costa, cambiamenti del materiale sul fondale, correnti causate da vento e onde, correnti di marea.

Il trasporto solido cross-shore si propaga in direzione normale alla costa e si genera nel caso di onde che incidono perpendicolarmente alla linea di riva ; i fattori che svolgono un ruolo predominante in questo processo

sono: le velocità degli orbitali che eccedono la celerità dell'onda, la corrente di undertow, e la componente normale del radiation stress  $\tilde{S}_{xx}$ . i gradienti nel trasporto solido nella direzione cross-shore sono responsabili nel creare profili della spiaggia più ripidi (in caso di erosione) o meno pendenti (in caso di sedimentazione). Quindi, il trasporto cross-shore è responsabile del modellamento del profilo della spiaggia durante le mareggiate e durante i periodi di calma.

Come noto, la condizione di incipiente movimento è stabilita dal criterio di Shields, per cui si ha il distacco della particella quando la forza di attrito eguaglia la resistenza idrodinamica esercitata dalla particella investita da un flusso. La particella poi viene trasportata perché la vena fluida non ne segue il profilo, si distacca e creando una turbolenza genera una forza che tende a sollevarla dal fondo e a spostarla verso valle.

In seguito al trasporto, sul fondale si generano le forme di fondo, che variano al variare del diametro della particella e della massima velocità orbitale al fondo.

La zona di spiaggia in cui il trasporto è attivo è detta spiaggia attiva, e si sviluppa a valle della profondità di chiusura.

Se ci spostiamo da largo a riva, l'evoluzione delle forme di fondo è la seguente: al largo non si ha quasi mai frangimento dunque non sono presenti forme di fondo perché non c'è trasporto attivo non essendoci corrente; avvicinandosi verso riva troviamo le **ripples**, che diventano sempre più irregolari fino ad incrociarsi e generare infine le ripples a mezzaluna. Le ripples sono piccole e regolari increspature del fondo caratterizzate da lunghezze pari a circa la metà dell'altezza d'onda che le ha generate e da un'altezza massima di circa 10 cm. Sempre al largo, oltre alle ripples, si formano le **dune**, grandi ondulazioni del fondale molto più lunghe e molto più alte delle ripples. Successivamente, arrivando in acque più basse, si incontrano le **barre**, strutture di grandi dimensioni che si formano grazie all'azione delle onde e delle correnti e che si sviluppano parallelamente alla costa. Le barre possono essere singole o multiple, permanenti o stagionali; la caratteristica della stagionalità deriva dal fatto che esse sono il frutto della modellazione del profilo di spiaggia dovuto alle mareggiate (storm profile). Durante le tempeste, infatti, il trasporto solido predominante è quello verso il mare e di conseguenza i sedimenti erosi e asportati dalla battigia vengono depositati al largo creando il profilo come illustrato dalla figura 12. Perciò, durante il periodo invernale o durante i casi di onde alte, si verifica una redistribuzione di materiale che viene eroso dalle dune accentuando la scarpata che caratterizza la berma invernale, per poi essere depositato nel mare antistante creando così le barre e riducendo la pendenza del fondale rispetto al periodo estivo.

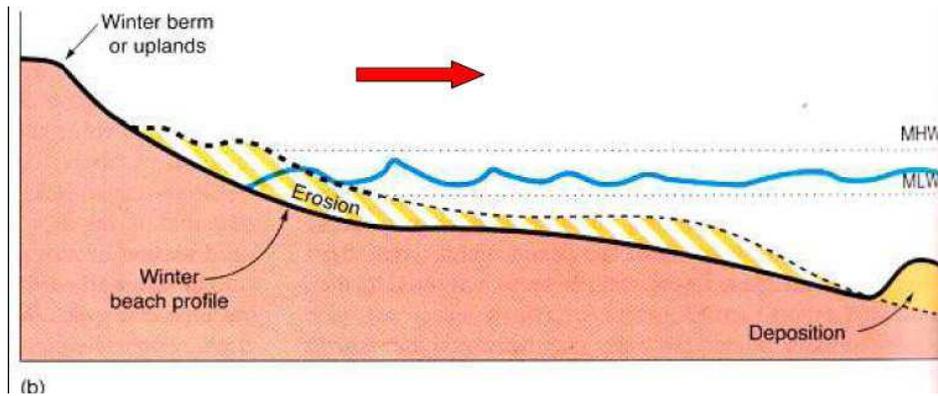


Fig. 12 Profilo di spiaggia invernale

Arrivati alla zona di risalita dell'onda troviamo la **berma** (vedi fig. 13), che consiste in una deposizione orizzontale di materiale e dipende dal run-up, dalla porosità del materiale di spiaggia e dal livello del mare.

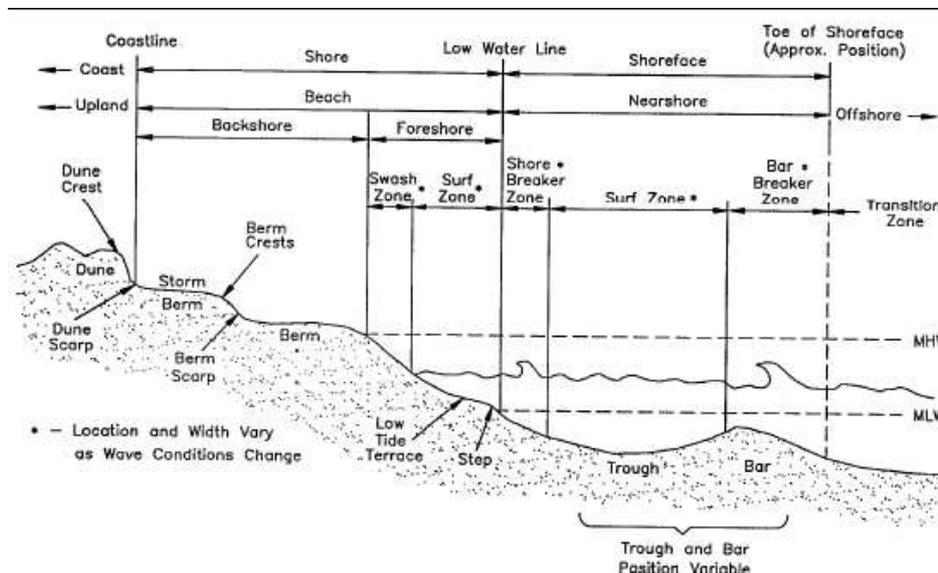


Fig. 13 Forme di fondo

Come già accennato, durante una mareggiata il profilo di una spiaggia è interessato dalla asportazione di materiale, in particolare nella parte emersa del litorale; i sedimenti vengono trasportati al largo e lì depositati andando a formare le barre di fondo. Durante questi periodi, a causa della maggiore altezza delle onde incidenti e della maggiore quota di risalita raggiunta durante il *run-up*, la spiaggia è sottoposta ad un intenso processo erosivo che non permette la formazione della berma. Invece, durante i periodi di calma e nella stagione estiva, onde poco elevate consentono il deposito sulla riva permettendo l'accrescimento della berma ed aumentando la ripidezza del litorale. Quindi, le caratteristiche della berma (altezza e ripidezza) sono strettamente dipendenti dalla quota del livello medio del mare e dal *run-up*. La combinazione di questi due fattori determina l'altezza della berma ed in particolare il livello massimo raggiunto dal deposito e il livello minimo al di sotto del quale esiste sempre attività ondosa.

La porzione di spiaggia che a noi interessa è quella attiva, perché è la zona in cui si sistemano le opere di protezione del litorale.

La spiaggia attiva subisce processi di trasformazione del profilo nel passaggio da periodi di buon tempo a periodi di mareggiata; in buon tempo, infatti, la spiaggia è più pendente e la sabbia tende ad accumularsi presso la riva mentre in mareggiata la sabbia erosa dalla spiaggia emersa finisce nella spiaggia sommersa, con effetto istantaneo.

Il rimodellamento del profilo dipende anche dalla granulometria della spiaggia: se la granulometria è più grossolana la percolazione dissipa l'energia dell'onda, la quale ha un ritorno più breve e porta via meno materiale. La spiaggia con ciottoli, infatti, è più ripida di una spiaggia di sabbia fine. Con granulometrie fini, la percolazione è minor dunque l'energia dissipata è minore e la spiaggia è meno ripida.

Per arrivare all'espressione che descrive il profilo di spiaggia partiamo dal definire l'energia che si dissipa per unità di superficie:

$$\frac{\partial}{\partial x}(Ec_g) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho g \frac{H^2}{16} c_g\right) = \frac{5}{16} \gamma^2 \rho (gh)^{3/2} \frac{dh}{dx}$$

L'energia dissipata per unità di volume (nell'ipotesi di altezza d'onda al frangimento limitata solo dal fondale, cioè trascurando la ripidità) è:

$$\frac{5}{16} \gamma^2 \rho g^{3/2} h^{1/2} \frac{dh}{dx} = \left(\frac{5}{16} \gamma^2 \rho g^{3/2}\right) \frac{2}{3} \frac{d}{dx}(h^{3/2})$$

Se tale energia dissipata è costante nello spazio:

$$h^{3/2} = Ax + B$$

In battigia vale che  $h=0$ , quindi  $B=0$ , e si ottiene:

$$h = Ax^{2/3}$$

La precedente espressione rappresenta il profilo di Bruun, cioè il profilo più semplice, il più teorico.

Il parametro A dipende dal diametro dei sedimenti della spiaggia, in particolare dalla loro velocità di sedimentazione.

Dunque il profilo dipende sia dal materiale di spiaggia che dalle condizioni ondose. E' ragionevole pensare che il campo entro il quale la spiaggia si possa definire in equilibrio sia compreso tra la profondità a cui le onde frangono eccezionalmente e la loro risalita sulla spiaggia. Oltre questo campo sostanzialmente non abbiamo modellazione della spiaggia.

Servendosi della semplice teoria di Bruun non si riesce a determinare la soluzione poiché in battigia  $\frac{dh}{dx}$  tende a infinito, ovvero il profilo di

spiaggia tenderebbe ad un muro verticale, mentre ha in realtà forma tipicamente lineare. Dunque ci si può servire di un altro profilo, quello di Kraus, che è più complicato del precedente perché tiene conto anche del processo di frangimento e delle proprietà del materiale ma non presenta il problema del muro verticale.

La zona di modellamento della spiaggia, inizia alla profondità a cui l'onda frange eccezionalmente, detta profondità di chiusura (closure depth) mentre finisce in corrispondenza della risalita delle onde sulla spiaggia (run-up), che dipende dall'altezza d'onda e dalla lunghezza delle onde al largo, così come dalla pendenza della spiaggia:

$$R_u = \xi_0 H = tg \alpha \sqrt{H_0 L_0}$$

La spiaggia attiva si estende per circa 6-8 metri.

Il trasporto solido si può distinguere in due tipologie: trasporto lungo riva e trasporto perpendicolare a riva.

Analizziamo dapprima il trasporto lungo riva.

Nelle ipotesi che:

- il trasferimento avvenga tutto per attrito colombiano;
- la spiaggia sia rettiline

ho la relazione di Inman & Komar:

$$I_{ls} = 0.77 S_{ls} c_b$$

Essendo:

$I_{ls}$  = trasporto in peso immerso

$S_{ls}$  = spinta delle onde lungo riva (radiation stress)

$c_b$  = scala delle velocità con cui il materiale è trascinato (celerità dell'onda al frangimento).

Nella precedente espressione c'è una forte dipendenza dall'altezza d'onda mentre manca la dipendenza dalla pendenza della spiaggia, poiché al variare della pendenza il trasporto si riduce come estensione e cresce come intensità, quindi l'effetto è compensativo; manca inoltre anche la dipendenza dal materiale di spiaggia, poiché al crescere delle dimensioni del materiale aumenta la sua velocità di caduta e diminuisce la capacità di trasporto. Di questi parametri, invece, tiene conto Kamphuis, con la seguente espressione:

$$\frac{I_{ls}}{\rho g H_{sb}^3 / T_p} = 1.3 \cdot 10^{-3} \left( \frac{H_{sb}}{L_{op}} \right)^{-1.25} \frac{H_{sb}}{D_{N50}} (tg \alpha_b)^{0.75} sen 2\beta_b^{0.6}$$

Dove:

$H_{sb}$  = altezza d'onda significativa al frangimento

$L_{op}$  = lunghezza d'onda al picco

$\alpha_b$  = pendenza locale della surf zone

$T_p$  = periodo di picco dell'onda

$D_{N50}$  = diametro nominale

Dalla precedente notiamo come l'aumento di dimensione dei grani comporta una riduzione del volume di materiale trasportato; infatti come detto prima, la granulometria influenza le condizioni di trasporto. Si può infine calcolare la portata di sedimenti trasportata lungo riva tramite:

$$Q_{ls} = \frac{I_{ls}}{(\rho_s - \rho_w)g(1-n)}$$

Dove  $n$  rappresenta la porosità del materiale. Inoltre, il termine  $(\rho_s - \rho_w)$  tiene conto della densità del materiale immerso; esso quindi considera la spinta verticale a cui è sottoposta una particella di sedimento immersa in un fluido. L'efficacia del trasporto dipende, attraverso il periodo dell'onda, dalla tipologia dei frangenti: il frangente di tipo plunging è più efficiente del frangente surging. Il trasporto perpendicolare a riva, invece, avviene nella zona al largo dei frangenti, in cui il flusso verso riva si ha in prossimità del fondo e in superficie mentre il flusso di ritorno si ha a media profondità.

### 1.5 Opere di difesa del litorale

I fenomeni di rimodellamento della linea di riva e del fondale sono molto importanti ai fini ingegneristici perché sono i fattori su cui ci si basa per la progettazione di quelle che possono essere le opere di difesa di un litorale. La difesa della costa interessa sia per motivi di tipo ambientale che socio-economico, essendo una delle più importanti fonti di ricchezza del nostro paese, soprattutto, nel caso particolare, dell'Emilia Romagna.

Le opere più frequenti che vengono realizzate per la protezione della costa dall'erosione sono le seguenti:

- pennelli
- moli
- barriere emerse e sommerse (a cresta bassa)

Questi tipi di opere vengono suddivise in due gruppi principali:

- opere trasversali: pennelli e moli;
- opere parallele: barriere emerse e sommerse.

I pennelli e i moli sono opere rigide posizionate perpendicolarmente alla costa e ad essa saldamente vincolate; possono essere costruiti in massi, pali di legno, cemento armato o palancole. Grazie alla loro disposizione, queste opere sono in grado di intercettare il trasporto solido long-shore e, quindi, di diminuire l'intensità delle correnti che si propagano lungo riva. Spesso queste correnti non vengono interrotte ma semplicemente deviate verso il largo: come si vedrà in seguito, il difetto principale di queste strutture è quello di spostare l'erosione in quei tratti di riva non protetti, anche se sono molto lontani dalle coste interessate dall'intervento. L'efficacia dei pennelli e dei moli nel diminuire il trasporto solido esistente è in funzione del tipo di materiale con cui è costruita la struttura e della lunghezza dell'opera stessa. Infatti, poiché le long-shore current si estendono su tutta la surf-zone poco oltre la profondità di chiusura  $h_c$ , per potere essere sicuri di intrappolare tutto il sedimento trasportato si dovrebbe costruire una struttura lunga fino all'ascissa corrispondente ad  $h_c$ , detta  $x_c$ . È evidente che, così facendo, l'efficienza dell'intercettazione va a scapito dei costi dell'opera, che crescono con la lunghezza della struttura stessa. Per questo motivo, i pennelli sono caratterizzati da una lunghezza variabile ma comunque inferiore ad  $x_c$ ; ciò non vale per i moli, i quali, anche a causa dei materiali di cui sono costituiti (prevalentemente cemento armato) determinano un'interruzione completa del trasporto solido lungo riva

generando enormi differenze fra l'estensione delle due spiagge adiacenti al molo.

Quindi, gli effetti generati da questi tipi di strutture sui processi morfodinamici e le loro interazioni col moto ondoso determinano la formazione di un andamento regolare della linea di riva chiamato "spiaggia a denti di sega". Questa particolare forma del litorale si genera a causa della riflessione e della differenza nelle altezze d'onda in prossimità della testata del pennello; questi due fenomeni producono rispettivamente erosione sottoflutto e deposito sopraflutto come illustra la figura successiva.



Fig. 14 Effetti dei pennelli sulla morfologia della spiaggia

Solitamente l'erosione è più accentuata rispetto alla sedimentazione in quanto la prima agisce su fondali progressivamente meno profondi mentre la seconda avviene su fondali sempre più elevati (Zanutigh, 2007).

Per evitare la formazione dell'andamento di una spiaggia a denti di sega, si è dimostrato che la realizzazione della testata del pennello a forma di T consente un elevato tasso di intrappolamento dei sedimenti proprio in prossimità della T. Inoltre, quando vengono realizzati dei pennelli in serie, bisogna considerare un'adeguata distanza fra un'opera e l'altra per consentire che le correnti presenti fra i due pennelli raggiungano velocità ottimali; cioè che esse siano né troppo intense da causare eccessiva erosione e né troppo deboli da permettere un deposito esagerato. È prassi considerare questa distanza fra due pennelli pari a due o tre volte la lunghezza dell'opera stessa.

Queste opere, tuttavia, pur assicurando una buona protezione dai processi erosivi nelle aree in cui sono realizzate, determinano l'interruzione del trasporto solido long-shore anche lungo le spiagge adiacenti. Infatti, il tratto di litorale che si trova sottoflutto rispetto alla zona di intervento non riceve più alimentazione di sabbia; quindi, se questa porzione di litorale non è protetta si osserva l'arretramento della linea di riva.

Per quanto riguarda le opere parallele alla costa, si considerano appartenenti a questo gruppo tutte le opere che sono disposte longitudinalmente rispetto alla costa e che hanno il compito di diminuire e smorzare l'energia ondosa e di contrastare il trasporto solido cross-shore: le barriere emerse e sommerse. Questi due tipi di barriere verranno descritte separatamente in quanto producono degli effetti molto diversi tra loro e, quindi, vengono utilizzati in situazioni abbastanza differenti. Infatti, le barriere emerse consentono alla massa d'acqua di ritornare verso il largo solo attraverso i varchi; una minima parte di quest'acqua può anche filtrare attraverso i massi costituenti la barriera. Le barriere sommerse, invece, permettono che una considerevole quantità di acqua torni verso il largo attraverso lo spazio presente fra la

cresta della struttura e la superficie libera. Ad ogni modo, il meccanismo con cui operano questi due tipi di opere è sostanzialmente lo stesso: esse inducono una brusca riduzione del fondale costringendo le onde a frangere e a dissipare energia abbastanza lontano da riva, in modo tale da diminuire il potere erosivo che il mare esercita sul litorale.

Le scogliere emerse sono state ampiamente utilizzate nei decenni scorsi; in realtà, col tempo, sono stati messi in luce tutti i difetti di queste opere rilevati nelle aree direttamente interessate dall'intervento e nelle spiagge adiacenti. Infatti, nonostante queste opere siano abbastanza efficaci dal punto di vista della stabilizzazione della linea di riva, esse comportano la riduzione della qualità delle acque nella zona protetta, la creazione di un paesaggio completamente artificiale nonché il problema dello spostamento dell'erosione in quei tratti di riva non protetti e posti anche ad una certa distanza dalle coste interessate dall'intervento.

Come già visto per i pennelli, anche le scogliere emerse sono in grado di intercettare una parte dei sedimenti trasportati dalla corrente long-shore, determinando un'interruzione dell'alimentazione di sabbia verso il litorale sottoflutto. Inoltre, esse non consentono alla zona protetta di cedere materiale: di conseguenza, si osserva sempre dell'erosione nel tratto di litorale sottoflutto ad una serie di scogliere emerse.

Le barriere emerse ostacolano il ricircolo dell'acqua favorendone la stagnazione e la cattura di inquinanti. Inoltre, queste opere sono in grado di impedire il trasporto di sedimenti verso il largo poiché rappresentano un ostacolo che intercetta la corrente di undertow; quindi, esse inducono la sedimentazione nel lato riva proprio dietro le opere, creando delle particolari strutture morfologiche chiamate *salienti*, *doppi salienti* e *tomboli* (fig. 15).

I primi consistono in lingue di terra a forma di cuspide che si formano sulla riva e si sviluppano in direzione delle barriere emerse. I doppi salienti invece sono due lingue di terra a forma di cuspide: una si forma sulla riva ed è diretta verso le barriere, l'altra si genera dietro alle scogliere e si estende verso la spiaggia. Infine, i tomboli si formano quando due doppi salienti si congiungono: sono quindi delle strisce di sabbia che collegano il litorale con un isolotto posto al largo o, come in questo caso, con una barriera emersa parallela alla costa. Salienti e tomboli si formano in quelle zone di calma dove il mare risente dell'effetto schermante dato dalla barriera; la loro formazione dipende dalla larghezza dei varchi e dalla distanza fra l'opera e la riva.



Fig. 15 Salienti, doppi salienti e tomboli

Durante la progettazione di una barriera emersa bisogna prestare particolare attenzione alle seguenti dimensioni: la larghezza dell'opera, la distanza da riva e l'ampiezza dei varchi. Il primo parametro è molto importante per assicurare la protezione della spiaggia mentre gli altri due fattori sono fondamentali per la formazione degli effetti morfologici sopra citati.

Per quanto riguarda la protezione del litorale esercitata da una barriera in termini di energia trasmessa a valle dell'opera, ci si serve del coefficiente di trasmissione, determinato da Van Der Meer tramite la seguente:

$$K_t = -0,3 \frac{R_c}{H_{si}} + 0,46$$

Dove  $R_c$  rappresenta l'altezza della cresta della barriera rispetto al livello medio del mare e  $H_{si}$  equivale all'altezza significativa dell'onda incidente. Secondo i risultati raggiunti da Van Der Meer nel 2005, la scabrezza dell'opera, ovvero la tipologia di massi con cui è stata costruita, influisce sui processi di trasmissione.

Un altro fattore di cui tenere conto nella realizzazione di una barriera è la larghezza dei varchi presenti fra due opere successive. È naturale che un'eccessiva larghezza del varco determini una riduzione del livello di protezione della costa operato dalle barriere; d'altra parte, se i varchi

sono troppo piccoli si ha una diminuzione della circolazione idrica con conseguente peggioramento della qualità dell'acqua.

A causa dell'elevato impatto ambientale esercitato dalle scogliere emerse e dei difetti che le caratterizzano diventa sempre più frequente e appropriato l'utilizzo di strutture sommerse o anche dette a cresta bassa.

Anche questi tipi di opere sono disposte parallelamente alla riva e possono essere realizzate con diversi materiali: sacchi di sabbia, massi (soluzione più diffusa) o geosacchi. Le scogliere sommerse, esattamente come quelle emerse, producono un brusco innalzamento del fondale che induce il frangimento delle onde; si ha, dunque, dissipazione di energia e quindi si ottiene una diminuzione del potere di trasporto dei sedimenti. Anche le barriere sommerse sono in grado di intrappolare le correnti di undertow: esse, quindi, interferiscono con il trasporto solido perpendicolare a riva e in particolare impediscono l'asportazione di sedimenti verso il largo.

Adottare come soluzione progettuale le barriere sommerse rispetto a quelle emerse comporta numerosi vantaggi quali: miglioramento della qualità delle acque dovuta ad una maggiore circolazione delle acque all'interno della zona protetta; eliminazione del problema dell'impatto visivo dato dalle barriere emerse; infine tali barriere portano all'eliminazione del problema di formazione di tomboli e salienti capaci di impedire la balneazione. Infatti, grazie alla sommergenza di queste opere, molta più energia ondosa passa all'interno della zona protetta prevenendo la formazione di queste strutture morfologiche, si osserva anche una minore erosione sul lato mare in quanto molta meno energia viene riflessa dall'opera, a causa della ridotta altezza della struttura sommersa.

Sussistono tuttavia connotazioni negative legate all'utilizzo di tali opere, che consistono sostanzialmente in: una minore protezione della spiaggia, dovuta alla cresta sommersa dell'opera. L'energia trasmessa verso riva sarà, dunque, maggiore. Inoltre le barriere sommerse sono in grado di intercettare in parte il trasporto solido long-shore, andando a determinare un effetto di riduzione dell'alimentazione di sedimenti per quelle spiagge poste sottoflutto. Infine grandi quantità di acqua superano la barriera e vengono raccolte dietro l'opera da una corrente progressivamente crescente diretta parallelamente a riva. Al termine della scogliera, quindi raggiunto il varco, queste correnti fuggono verso il largo sotto forma di rip currents. Quindi, le opere sommerse presentano delle rip currents molto più intense soprattutto ai varchi rappresentando un maggior pericolo per la balneazione.



# CAPITOLO 2

## **Il rischio nelle aree costiere e il cambiamento climatico**

### **2.1 Analisi del rischio**

Il concetto di rischio e dell'analisi del rischio è fondamentale ai fini di una efficiente gestione delle emergenze nel campo dell'inondazione delle aree costiere e della messa a punto di sistemi di protezione adeguati.

Il motivo per cui si ricorre all'analisi del rischio risiede nella necessità di conoscere l'entità delle perdite che si possono avere in casi di inondazione e/o di erosione costiera. Tali perdite si riconducono principalmente a perdite di tipo economico (come i danni materiali ma anche danni al turismo, alle attività produttive ecc.), e perdite di vite umane, nonché a perdite dell'integrità dell'ambiente naturale costiero e dell'entroterra che ospita habitat di specie vegetali e animali.

Il rischio è definito come la probabilità di accadimento di un evento, moltiplicata per la sua gravità, o magnitudo.

Nel caso dell'inondazione o dell'erosione costiera, parametri come i livelli dell'acqua, il vento, le onde, le tipologie e le condizioni delle difese costiere sono parametri che possono essere usati per stimare la probabilità di inondazione e il potenziale collasso delle difese costiere. Dati socio-economici e demografici sono usati per stimare la gravità e le possibili conseguenze di inondazione o erosione in termini di danni alle persone e agli edifici o all'ambiente naturale.

Il rischio, tuttavia, è un concetto dinamico che cambia sia nello spazio che nel tempo. Gli impatti del cambiamento climatico e i cambiamenti socio-economici guidano tali cambiamenti, e anche le condizioni delle difese dall'inondazione possono migliorare o peggiorare. Per questo motivo si può definire anche il rischio futuro, come la probabilità sotto scenari diversi moltiplicata per la magnitudo sotto scenari diversi.

Il tipo di evento che generalmente viene considerato rischioso nella gestione delle aree costiere è l'inondazione. Un problema relativo all'inondazione è l'erosione costiera (vedi figura 1). Si sa che l'erosione costiera va guardata da due prospettive: primo, l'erosione può portare alla perdita di terre e aree intertidali, con le relative conseguenze economiche e sociali.



Fig. 1 Effetti dell'erosione costiera sugli abitati. (www.ecoblog.it)

Secondo, l'erosione costiera è una potenziale minaccia ai sistemi di difesa dall'inondazione, sia naturali che artificiali. Per questa seconda prospettiva, l'erosione costiera dovrebbe essere considerata parte integrante dell'analisi del rischio da inondazione.

Tipicamente, le differenti aree costiere sono soggette a diverse probabilità di inondazione; la probabilità di inondazione dipende dai carichi idraulici dei livelli d'acqua e delle onde, dovuti all'interazione dei movimenti di acqua e vento, in relazione alle caratteristiche fisiche degli esistenti sistemi di difesa naturali e artificiali.

Le probabilità attuali sono determinate da un numero di complessi processi naturali di natura stocastica. Dunque il rischio va considerato come concetto dinamico e richiede un approccio probabilistico.

Una volta dati la natura dei processi e i meccanismi coinvolti, l'analisi del rischio da inondazione è soggetta ad un numero maggiore di incertezze relative a:

- naturale variabilità;
- incertezza della conoscenza.

Tra le maggiori incertezze che si possono incontrare nell'analisi del rischio ci sono:

- lo sviluppo di carichi idraulici che portano al collasso dei sistemi di difesa (in relazione al cambiamento climatico);
- le performance dei sistemi di difesa, la collocazione e la natura del collasso (meccanismo di collasso e estensione di possibili varchi);
- l'estensione, la durata e la profondità dell'evento di allagamento;
- l'estensione dei danni dell'allagamento e vittime (in relazione a sviluppi economici e demografici).

L'obiettivo dell'analisi del rischio è di comprendere e quantificare il rischio costiero presente e futuro per identificare e valutare possibili azioni per ridurlo.

In principio, l'analisi del rischio costiero è la valutazione di un ampio range di misura e strategie per ridurlo, nonché riducendo la probabilità di accadimento o le conseguenze degli eventi di allagamento.

Analisi più specifiche vengono poi usate per stabilire le misure di protezione dall'inondazione richieste per mantenere in futuro il livello di sicurezza. I livelli di sicurezza desiderati deriverebbero dal bilanciare la riduzione nei rischi che si avrebbero calando la probabilità di collasso del sistema di difesa con i costi per migliorare tali difese per raggiungere una diminuzione della futura probabilità di collasso.

Il rischio futuro per le zone di costa è fortemente influenzato dall'utilizzo che si fa di tali zone. Storicamente, infatti, le aree costiere sono state l'area naturale in cui si insediavano le attività umane di una sostanziale parte della popolazione mondiale, da cui derivava quindi la nascita di attività economiche e sociali. Ciò ha portato ad un continuo e crescente processo di sviluppo intensivo e di intensiva modificazione delle aree costiere. In molti posti, questo sviluppo delle attività umane ha diminuito la *resilienza* del sistema costiero disturbando i processi naturali e causando altri effetti ambientali avversi. Per resilienza si intende la capacità del luogo di adattarsi ai cambiamenti indotti dall'aumento del livello del mare, ad eventi estremi e occasionali impatti di natura antropica. Il concetto di resilienza è particolarmente importante alla luce delle previsioni dei cambiamenti climatici. La resilienza dipende da due fattori chiave: sedimenti e spazio per i processi costieri.

Le misure proposte dai progetti condotti a livello europeo per l'adattamento all'erosione includono la designazione e il mantenimento di riserve strategiche di sedimenti. Le principali riserve agirebbero da 'zone tampone' direttamente proteggendo la costa dal mare, o mirando ad assicurare un sufficiente volume di sedimenti a disposizione delle celle costiere attive per permettere alla spiaggia di prendere il ritmo con la crescita del livello del mare.

Inoltre, gli impatti del cambiamento climatico aggraveranno significativamente le future pressioni provenienti dal mare, fatto dovuto agli effetti combinati dell'innalzamento del livello delle acque marine con l'aumento della popolazione. Per questo motivo le aree costiere diventeranno sempre più vulnerabili, ossia sempre più soggette al rischio di inondazione e erosione.

Con *vulnerabilità* si intende, infatti, l'attitudine di una determinata componente ambientale (popolazione, edifici, infrastrutture, servizi, ecc..) a sopportare gli effetti in funzione dell'intensità dell'evento. La vulnerabilità esprime il grado di perdite di un dato elemento o di una serie di elementi risultante dal verificarsi del fenomeno di una data magnitudo.

Nella gestione del rischio, quindi, occorre anche tener presente di come poter ridurre la vulnerabilità di un luogo, magari provvedendo, nel caso di un'inondazione, a trovare spazio per lasciare sfogare il flusso di acqua che altrimenti allagherebbe un territorio.

Dagli studi condotti a livello europeo emerge che la vulnerabilità delle aree costiere è destinata ad aumentare nei prossimi 50-100 anni.

### *2.1.1 Metodi in letteratura per mappe qualitative del rischio*

Di seguito si descrivono brevemente due metodi disponibili in letteratura per produrre mappe qualitative del rischio relative all'erosione costiera e all'inondazione. Sono stati scelti gli approcci di EUROSION (2004) e di

Gornitz et al. (1994) per la loro semplicità ed adattabilità ai diversi ambienti costieri.

Il metodo proposto da EUROSION (2004) mira a rappresentare i presenti e futuri fattori di pressione, così come il potenziale impatto di erosione e inondazione, alle attività situate nelle aree costiere.

E' basato su un modello semplificato di Forza motrice- Pressione- Stato- Impatto- Risposta (in inglese DPSIR, cioè Driving force- Pressure- State- Impact- Response) come proposto dall'Agenzia Europea Ambientale. Per fornire un'idea delle aree che potrebbero essere affette da erosione o inondazione nei prossimi 100 anni, il modello introduce il concetto di Raggio di Influenza dell'Erosione Costiera (RIEC). Il RIEC, tenendo conto della crescita del livello del mare, subsidenza e altri parametri come maree, estremi di mareggiata, morfologia del fondo e della linea di riva, è definito come tutte le aree entro i 500 m dalla linea di riva estese alle aree fino a -5 m.

Una volta definito il RIEC l'approccio considera 13 indicatori, 9 relativi alla pressione e 4 all'impatto dell'inondazione costiera e erosione nelle condizioni presenti e future (Tabella 1).

METHODOLOGY FOR RATING EUROPEAN REGIONS IN TERMS OF COASTAL EROSION AND FLOODING			
Indicator	0 point	1 point	2 points
<b>Pressure scoring</b>			
1) Relative sea level rise (best estimate for the next 100 years)	< 0 cm (per region)	Between 0 and 40cm (per region)	> 40 cm (per region)
2) Shoreline evolution trend status	Less than 20% of the shoreline is in erosion or in accretion (per region)	Between 20% and 60% of the shoreline is in erosion or in accretion (per region)	More than 60% of the shoreline is in erosion or in accretion (per region)
3) Shoreline changes from stability to erosion or accretion between the 2 versions (CCER and CEL)	Less than 10% of the shoreline changes between the 2 versions (CCER and CEL)	Between 10 and 30% of the shoreline have changed between the 2 versions (CCER and CEL)	More than 30% of the shoreline have changed between the 2 versions (CCER and CEL)
4) Highest water level	Less than 1,5 meters	Between 1,5 and 3 meters	More than 3 meters
5) Coastal urbanization (in the 10 km land strip)	Urban areas (in km2) have increased of less than 5% between 1975 and present	Urban areas (in km2) have increased of 5 to 10% between 1975 and present	Urban areas (in km2) have increased of more than 10% between 1975 and present
6) Reduction of river sediment supply (ratio)	Ratio between effective volume of river sediment discharged and theoretical volume (i.e. without dams) is superior to 80%	Ratio between 50 and 80%	Ratio is less than 50%
7) Geological coastal type	> 70% of "likely non erodable" segments <sup>1</sup>	"likely non erodable segments" between 40% and 70%	< 40% of "likely non erodable segments"
8) Elevation	< 5% of the region area lies below 5 meters	Between 5 and 10% of the region area lies below 5 meters	> 10% of the region area lies below 5 meters
9) Engineered frontage (including protection structure)	< 5% of engineered frontage along the regional coastline	Between 5% and 35% of engineered frontage along the regional coastline	> 35% of engineered frontage along the regional coastline
<b>Impact scoring</b>			
10) Population living within the RICE	< 5,000 inhabitants per region	Between 5,000 and 20,000 inhabitants per region	> 20,000 inhabitants per region
11) Coastal urbanization (in the 10 km land strip)	Urban areas (in km2) have increased of less than 5% between 1975 and present	Urban areas (in km2) have increased of 5 to 10% between 1975 and present	Urban areas (in km2) have increased of more than 10% between 1975 and present
12) Urban and industrial living within the RICE	< 10% of the land cover within the RICE is occupied by urban and industrial areas (per region)	Between 10% and 40% of the land cover within the RICE is occupied by urban and industrial areas (per region)	> 40% of the land cover within the RICE is occupied by urban and industrial areas (per region)
13) Areas of high ecological value within the RICE	< 5 % of areas of high ecological value within the RICE per region	Between 5% and 30% of areas of high ecological value within the RICE per region	> 30% of areas of high ecological value within the RICE per region

Tabella 1

Questo metodo potrebbe richiedere un adattamento degli indicatori. Il metodo di Gornitz et al. (1994) definisce l'obiettivo e un criterio univoco per la classificazione della vulnerabilità costiera, fornendo anche indicazioni utili per piani di gestione integrati.

Una data fascia costiera è descritta prima attraverso un set di variabili appartenenti ai seguenti gruppi:

- condizioni di tempo marino, che hanno una importanza significativa nel caratterizzare il rischio di eventi estremi;
- condizioni fisiche (larghezza e altezza della spiaggia emersa, granulometria principale e pressione d'uso) che caratterizzano il sistema spiaggia in termini di capacità di mitigazione contro la sommersione;
- evoluzione della linea di riva (andamenti della costa recenti e storici) che indica il comportamento del sistema spiaggia nel breve e nel lungo termine;
- subsidenza del territorio costiero che influenza la sommersione costiera;
- tipologie delle strutture di difesa lungo la costa e nell'entroterra, che identifica la mitigazione passiva della spiaggia nei confronti della sommersione.

Il grado della tendenza alla sommersione o di vulnerabilità è sintetizzato dall'uso di indici, in particolare:

- la vulnerabilità potenziale  $V_p$ : esprime il grado della tendenza geomorfologica, sedimentaria e antropogenica alla sommersione senza tenere conto delle protezioni esistenti. La valutazione di  $V_p$  è fatta attraverso la seguente espressione:

$$V_p = v_1 k_1 + v_2 k_2 + v_3 k_3 + \dots + v_n k_n \quad (1)$$

dove  $v$  è il valore codificato della variabile seguendo un'appropriata divisione in classi e  $k$  è il peso della variabile a seconda del suo contributo alla vulnerabilità del sistema.

- L'efficienza totale delle strutture IED definita come:

$$IED = IES + D_i \quad (2)$$

dove IES è l'Indice di Efficienza e di Stabilità per le dune naturali e  $D_i$  è l'efficienza di ogni struttura di difesa.

- L'efficienza di ogni struttura di difesa  $D_i$  è rappresentata da:

$$D_i = d * V_{pmax} / e_{max} \quad (3)$$

dove  $d$  = valore originale della classe della struttura,  $V_{pmax}$  = massimale teorico di  $V_p$ ,  $e_{max}$  = classe massima di efficienza relativa alla struttura. I valori di  $e_{max}$  vengono assegnati a seconda della posizione della struttura (in mare, sulla spiaggia, etc.), della tipologia (pennelli, frangiflutto, barriere, etc.) e del materiale di costruzione (massi, calcestruzzo, etc.). I valori di  $d$  vengono attribuiti basandosi sulla presenza della difesa in una data fascia di costa.

- L'Indice di Efficienza e Stabilità per le dune naturali IES è definito come:

$$IES = \sum V_i / n \quad (4)$$

dove  $V_i$  rappresenta le variabili relative alle dune: altezza della cresta della duna, pendenza lato mare della duna (cioè rapporto tra altezza e larghezza lato mare), continuità lungo costa del sistema di dune (cioè rapporto tra lunghezza delle dune lungo costa e lunghezza della distanza lungo riva), stato di conservazione (presenza di varchi) e copertura vegetale (cioè rapporto tra superficie coperta e superficie totale). Il valore di  $n$  è dato dalla somma dei valori massimi attribuiti alle variabili e si usa normalizzare IES nel range 0-1.

Infine la reale vulnerabilità  $V_r$  di ogni fascia costiera si ottiene considerando che la vulnerabilità potenziale è mitigata dalle difese naturali e artificiali:

$$V_r = V_p - IED \quad (5)$$

Il grado di rischio ( $R$ ) dipende sia dalla vulnerabilità reale  $V_r$  sia dal valore socio-economico dell'area:

$$R = V_r \cdot E \quad (6)$$

dove  $E$  rappresenta la valutazione del valore sociale, economico, naturale delle zone esposte o il costo in termini monetari degli impatti diretti o indiretti. Stando ai risultati e alle caratteristiche globali dell'area costiera sotto esame, i valori del rischio potrebbero essere alla fine suddivisi in categorie.

### 2.1.2 Metodi di affidabilità di II° livello

Questa sezione presenta la procedura a due passi per scopi di gestione costiera. Il primo passo permette di valutare la frequenza di inondazione lungo una vasta linea di costa. Il secondo passo fornisce informazioni riguardanti le conseguenze dell'inondazione in termini di profondità, estensione e rapidità.

Il primo passo è un metodo monodimensionale da largo alla battigia. L'obiettivo è di fornire una valutazione approssimata della probabilità di inondazione lungo un largo litorale ed è condotta lungo profili selezionati rappresentativi di larghi tratti.

Per raggiungere questo obiettivo, si utilizza un'analisi di II° livello usando il software STRUREL (o equivalenti). Per definire in un modo semplice e quantitativo il processo di inondazione, il meccanismo di collasso proposto è dato da:

$$(Z_m + \eta + R_{up2\%}) - (R_{c0} - S_{ubs}) \geq 0 \quad (7)$$

dove  $Z_m$  è la profondità media dell'acqua derivata dalla marea e dagli effetti del cambiamento climatico;  $S_{ubs}$  è la subsidenza;  $\eta$  è il set-up;  $R_{up2\%}$  è il run-up corrispondente al valore caratteristico della probabilità eccedente del 2%;  $R_{c0}$  è l'altezza della cresta della riva (corrispondente all'altezza della spiaggia più l'altezza della duna, se applicabile).

Nella precedente equazione il primo termine in parentesi rappresenta il carico mentre il secondo rappresenta la resistenza. La resistenza costiera è relativa al profilo della spiaggia, l'integrità e la resilienza delle difese

naturali e artificiali. L'equazione sopra scritta è basata sulle seguenti assunzioni semplificate:

- profilo della spiaggia non erodibile;
- assenza di falle nelle difese contro le onde e i carichi di marea (quindi sottostima dell'attuale rischio di inondazione).

Inoltre, la funzione di fallimento non tiene conto della magnitudo dell'inondazione nell'entroterra (per esempio, l'effetto di poche onde che tracimano non viene distinto dall'effetto di una completa inondazione), portando a una conseguente sovrastima del danno. In pratica, finchè lo stato limite che causa fallimento nell'equazione sopra è rappresentato da  $R_{up2\%}$ , si può considerare che il fallimento sia causato da un grado di inondazione percepito dagli abitanti del luogo. In alternativa, l'equazione sopra può essere riformulata per considerare l'inizio della tracimazione, ad esempio una funzione in cui l'inondazione avviene dove l'onda più alta della mareggiata supera la riva. In questo caso  $R_{up\max}$  potrebbe rimpiazzare  $R_{up2\%}$ . Questo approccio sarebbe comunque troppo conservativo e i risultati sarebbero molto più difficili da verificare sul campo.

Il set-up nell'equazione precedente è espresso come:

$$\eta - \eta_b = U_\eta \frac{\frac{3}{8} \gamma^2}{1 + \frac{3}{8} \gamma^2} (h_b - h) \quad (8)$$

dove  $U_\eta$  è l'incertezza del modello,  $h$  è la profondità dell'acqua,  $\eta_b$  e  $h_b$  sono  $\eta$  e  $h$  al frangimento, e l'indice di frangimento  $\gamma$  è valutato per onde a profondità limitata stando a Kamphuis (1991):

$$\gamma = \frac{H_{sb}}{h_b} = 0.56e^{3.5m} \quad (9)$$

in cui  $m$  è la pendenza del fondo al largo e  $H_{sb}$  l'altezza significativa d'onda al frangimento.

Il run-up solitamente è stimato sulla base del parametro di Iribarren  $\xi$  che è (Burchart et al., 2007):

$$R_s/H_s = 1.35 \cdot \xi_p, \text{ se } \xi_p \leq 2; R_s/H_s = 3.00 - 0.15 \cdot \xi_p \text{ se } \xi_p \geq 2 \quad (10)$$

dove il pedice "p" denota il periodo di picco dell'onda,  $R_s$  è il run-up significativo, correlato a  $R_{up2\%}$  della distribuzione di Rayleigh e il numero di onde e  $H_s$  è l'altezza significativa d'onda tenendo conto dell'effetto di riparo delle barriere per la protezione costiera. Il parametro di Iribarren si intende per pendii dritti, mentre i profili della spiaggia emersa in presenza di dune o di argini mostrano geometrie complesse. Finora non ci sono metodi adatti per il contesto probabilistico di II° livello per valutare il run-up su pendii variabili. Si propone il procedimento seguente:

- il profilo viene diviso in tratti a pendenza costante;

- il run-up  $R_s$  viene calcolato su ogni pendenza, nell'ordine (cioè ad esempio dal largo alla riva) basandosi sull'equazione precedente;
- su ogni pendenza c'è una dissipazione dell'energia d'onda, cosicché l'altezza ridotta dell'onda incidente sulla pendenza successiva si ricava da un bilancio di energia. L'energia dissipata si valuta come quella associata all'onda per cui  $R_s$  uguaglia la cresta di ogni tratto.

Stabilito che la distribuzione statistica di ogni variabile è assegnata, il metodo di II° livello permette di ottenere la probabilità di fallimento, il punto di progetto (ad esempio la combinazione più probabile di variabili che portano al fallimento), e la sensitività di ogni variabile (per esempio un indicatore della validità di ogni variabile alla probabilità di fallimento).

### 2.1.3 Applicazione dei metodi qualitativi di letteratura

Dopo un attento esame degli indicatori proposti dall'approccio di EUROSION (tabella 1) sulle condizioni del sito, vengono introdotte alcune modifiche. Non sono stati usati, nella nostra applicazione, i seguenti indicatori:

- crescita relativa del livello marino (indicatore 1), poiché è stato assunto stabile a scala regionale;
- livello più alto dell'acqua (indicatore 4), perché le sue variazioni possono essere assunte insignificanti;
- urbanizzazione costiera (indicatori 5 e 11) per la mancanza di dati;
- geologia della costa (indicatore 7) perché è lo stesso di tutta la costa dell'Emilia Romagna.

Questi indicatori sono stati rimpiazzati da altri che sono più rilevanti per il territorio (tabella 2):

- tasso annuale di subsidenza (indicatore 1 in tabella 2);
- estensione e variazione del sistema costiero di dune (indicatori 4 e 5), perché rappresentano un elemento fondamentale per l'equilibrio dinamico della spiaggia;
- larghezza della spiaggia emersa (indicatore 7), perché gioca un'importante funzione per la protezione di un territorio pianeggiante.

<b>PRESSURE SCORING</b>				
<b>Indicator</b>		<b>Score</b>		
		0	1	2
1	Rate of subsidence (mm/a)	<9	9-12	> 12
2	Shoreline evolution (erosion or accretion) between 1996 and 2005*	< 20 %	20 - 60%	> 60%
3	Shoreline changes from stability to erosion or	< 10	10 -	> 30

	accretion, 1982-2005*	%	30%	%
4	Extension of the dune systems	> 60 %	30 - 60%	< 30 %
5	Changes of the extension of the dune systems, 1982-2005*	< 20 %.	20 - 60%	> 60 %
6	Changes of the theoretical river sediment supply	> 80 %	50 - 80%	< 50%
7	Width of the emerged beach (m)	> 60 m	20 - 60 m	< 20 m
8	Surface of coastal areas below 0 m	< 5 %	5 - 10 %	> 10 %
9	Engineered frontage (including the protections) along the coast	< 5 %	5 - 35 %	> 35 %
<b>IMPACT SCORING</b>				
10	Population living within the RICE	< 500	500 - 3.000	> 3.000
11	Extension of urban and areas within the RICE	< 10 %	10 - 40 %	> 40 %
12	Extension of areas of high ecological value within the RICE	< 5 %	5 - 30 %	> 30 %

Tabella 2

Inoltre, si fa l'assunzione che un sistema possa migliorare i suoi parametri fisici nel tempo e dunque incrementare la sua resistenza. Essendo tutti gli altri indicatori valutati in un range 0-2 basato su EUROSION, una diversa stima viene quindi usata per gli indicatori 2, 3 e 5 i cui valori variano tra -2 e 2; vedere i dettagli in tabella 3.

Indicator 2 in Tab. 3, Shoreline evolution (%) between 1996 and 2005	Erosion	
	0 – 10	2
	10 – 60	1
	> 60	0
	Accretion	
	0 – 10	-2
	10 – 60	-1
Indicator 3 in Tab. 3, Coastline evolution (%)	> 60	2
	20 – 60	1
	20 - -20	0

between 1982 and 2005	-20 - -60	-1
	< - 60	-2
Indicator 5 in Tab. 3, Change of the dune extension (%)	< -60	2
	-60 - -20	1
	-20 – 20	0
	20 – 60	-1
	> 60	-2

Tabella 3

Per ridurre il valore dell'esposizione al rischio, le variazioni corrispondenti ad un miglioramento dello stato ambientale contro l'erosione o l'inondazione vengono valutate con valori negativi.

Globalmente i valori dati alle pressioni e agli impatti sono riassunti in un unico livello di rischio R.

Il metodo di regressione multipla viene applicato seguendo i seguenti passi:

- identificazione dei geo-indicatori come mostrato in tabella 4;

Parameters	Unit	Codified values (v)					Weight (k)
		0	1	2	3	4	
Width of the emerged beach	m	>120	120<>90	90<>60	60<>30	<30	0.6
Height of the emerged beach	m.s.l.m. m	>3.2	2.7<>3.2	2.2<>2.7	1.7<>2.2	<1.7	0.7
Width of the shoreface	m	>510	510<>440	440<>370	370<>300	<300	0.7
Volume change of the beach	m <sup>3</sup> /m/y	>+20	+20<>+5	+5<>-5	-5<>-20	<-20	0.6
Shoreline variation (1978/2000)	m/y	>+1.5	1.5<>0.5	0.5<>-0.5	-0.5<>-1.5	>-1.5	0.4
Subsidence	mm/y	-	-	<-9	-9<>-12	>-12	0.3
Mean grain diameter	Phi	<1.9	2.05<>1.9	2.2<>2.05	2.35<>2.2	>2.35	0.1
Pressure of use	presence/m	<50	100<>50	150<>100	200<>150	>200	0.2

Tabella 4: geoindicatori, valori codificati e pesi per l'approccio di regressione multipla.

- stima della vulnerabilità potenziale  $V_p$  dall'equazione 1 basata sui valori codificati e i pesi assegnati ai geo-indicatori in tabella 4;
- valutazione di  $D_i$  dall'equazione 3 basata sul massimo dell'efficienza  $e_{max}$  e sui pesi  $d_i$  assegnati ad ogni tipo di difesa: rivestimento della spiaggia ( $e_{max} = 4$ ,  $d_i = 0.7$ ), barriere emerse ( $e_{max} = 4$ ,  $d_i = 0.2$ ), barriere sommerse ( $e_{max} = 2$ ,  $d_i = 0.1$ ) e riva ( $e_{max} = 4$ ,  $d_i = 0.9$ );
- calcolo di IES con l'equazione 4 basandosi sui valori delle variabili relative alle dune (altezza della duna, profondità della duna lato mare, continuità lungo riva, stato della duna, copertura di vegetazione della duna) e i loro pesi (rispettivamente: 0.4, 0.1, 0.2, 0.1, 0.1);
- calcolo di IED con l'equazione 2 e quindi calcolo di  $V_r$  con l'equazione 5;
- stima di E usando i seguenti valori approssimati: 1 per aree naturali, 2 per aree che includono case sparse, 3 per gruppi di case adiacenti che possono essere viste come campeggi equipaggiati, 4 per gruppi di case vicine con strade, luoghi e infrastrutture con servizi permanenti (aree urbanizzate);
- infine valutazione di R con l'equazione 6.

I dati usati per la valutazione di ogni indicatore in entrambi i modelli derivano dal database della regione Emilia Romagna, da Idroser (1996) e il calcolo deriva da Simeoni et al. (2003).

Il rischio R è suddiviso nelle seguenti categorie:

- $R < 0$ , molto basso;
- $0 < R < 10$ , basso;
- $10 < R < 20$ , moderato;
- $20 < R < 30$ , alto;
- $R > 30$ , molto alto.

Per fornire un esempio di risultato si consideri che questa procedura è stata applicata al litorale emiliano romagnolo, da Lido di Volano a Riccione, e i risultati sono mostrati in figura:

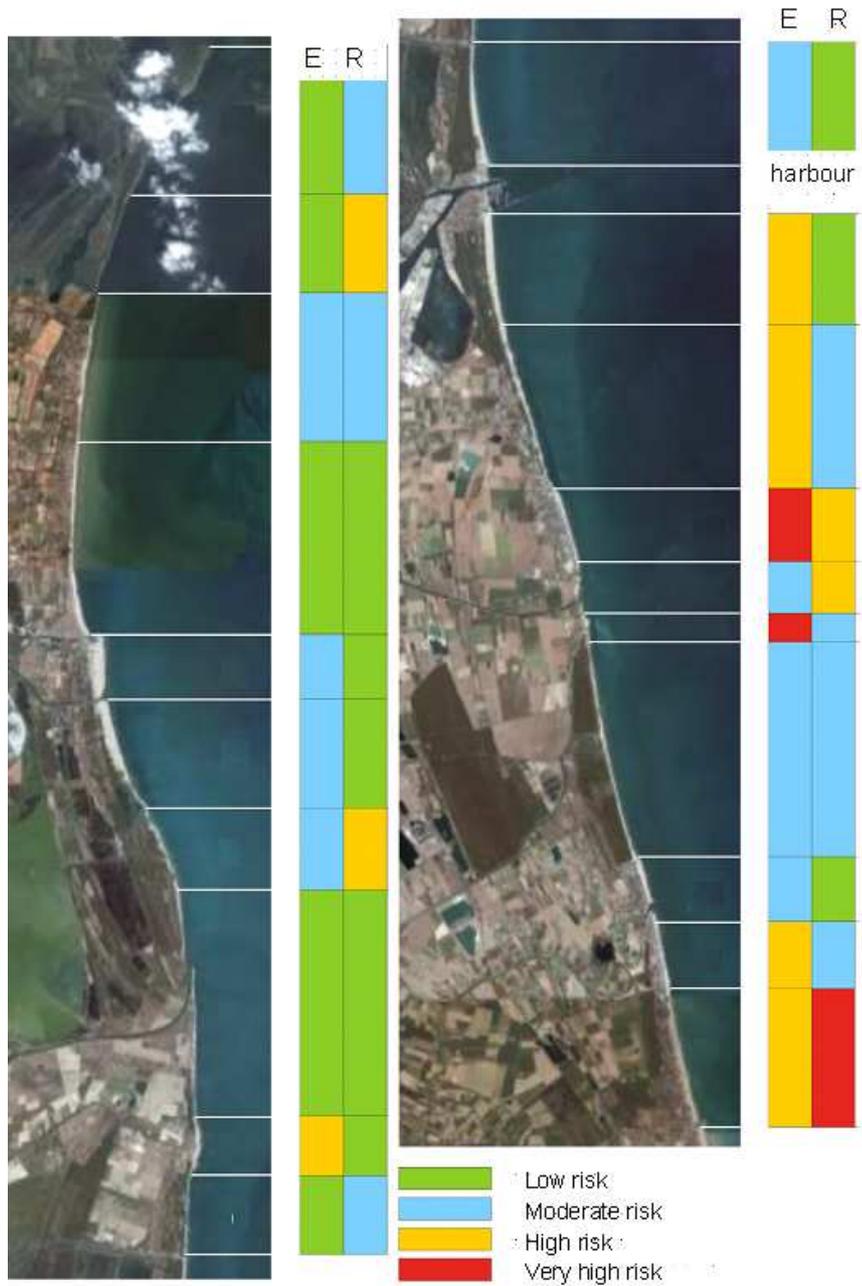


Fig. 2 Mappa del rischio lungo il litorale della regione Emilia Romagna basato sull'approccio modificato di EUROSION ('E') e basato sull'approccio della regressione multipla ('R'). La ricerca è stata condotta dall'Università di Ferrara nell'ambito del progetto Beachmed-e ([www.beachmed.eu](http://www.beachmed.eu)).

Per dare un'idea generale, il rischio lungo il litorale determinato con i metodi 'E' e 'R' è rispettivamente:

- basso: 32 e 43%;
- moderato: 39 e 37%;
- alto: 24 e 14%;
- molto alto: 5 e 6%.

E' di fatto sorprendente la discrepanza dei due modelli nella stima del numero di aree esposte a basso e alto rischio. Questo mostra che anche i metodi qualitativi necessitano di una calibrazione appropriata.

Sarebbe da notare che nessuna reale condizione di erosione e inondazione può essere associata alle informazioni derivate dai metodi sopra descritti: cosa significa il termine "alto" o "basso" livello di rischio in termini di probabilità di inondazione, estensione dell'area inondata nell'entroterra, rapidità del processo di inondazione, esposizione dei beni e relativi danni?

Di seguito si cercherà di rispondere ad alcuni di questi problemi per correlare i risultati qualitativi con le stime quantitative del rischio.

#### 2.1.4 Mappe quantitative del rischio

I metodi monodimensionali descritti nel paragrafo precedente sono stati applicati alla costa dell'Emilia Romagna. Vengono ricavate mappe che mostrano la probabilità di inondazione di 5 anni e da esse viene proposto un Indicatore Costiero di Inondazione calibrato qualitativo, basato su semplici parametri geometrici. Di seguito si illustrano le variabili statistiche di input e si discutono poi i risultati.

Le statistiche usate per l'analisi monodimensionale sono date nella tabella 5:

Label	Variable	Distribution	Mean	Std
QuotaSp	Beach elevation (m)	Log-Normal	*	*
AltD	Dune height (m)	Normal (Gauss)	*	*
Zm	Tide (m)	Log-Normal	0.12( $H_s-1$ )	0.26
Subs	Subsidence (m)	Log-Normal	0.01	0.005
xTanA	Dune slope (-)	Log-Normal	*	*
Dm5	Distance from the shoreline of isobath -5 m (m)	Log-Normal	*	*
Hso	Offshore significant wave height (m)	Gumbel	4.00	2.20
sop	Offshore wave steepness (-)	Log-Normal	0.024	0.012
kt	Transmission coefficient (-)	Constant	1	-
	No barrier	Log-Normal	0.65	0.15
	Submerged barrier	Log-Normal	0.40	0.15
	Emerged barrier			

Tabella 5. Tipo di distribuzione statistica per ogni variabile meteo marina e geometrica. La media e la deviazione standard per ogni variabile meteo marina deriva dalle relazioni regionali corrispondenti ai

carichi estremi in 5 anni. La media e la deviazione standard delle variabili geometriche (denotate con ‘\*’) sono riportate nella tabella 5 poiché sono definite per ogni tipico profilo costiero trasversale (vedi Figura 3) .

	Dm5		LargSp		QuotaSp		AltD		xTanA	
	Mean	Std	Mean	Std	Mea n	Std	Mea n	Std	Mea n	Std
<b>P1</b>	1011.00	93.75	52.00	27.02	1.30	0.24	2.00	0.58	0.16	0.05
<b>P2</b>	2032.00	93.75	12.00	27.02	0.80	0.24	0.00	0.58	0.00	0.05
<b>P3</b>	862.50	116.67	61.00	16.97	2.10	0.28	3.55	0.21	0.13	0.15
<b>P4</b>	643.00	205.06	166.50	71.42	1.60	0.14	3.65	0.92	0.20	0.01
<b>P5</b>	414.57	74.88	46.71	20.56	1.69	0.44	2.20	0.71	0.03	0.02
<b>P6</b>	293.50	7.78	17.50	9.19	2.30	0.14	0.75	1.06	0.05	0.07
<b>P7</b>	550.00	93.75	116.00	27.02	1.60	0.24	1.30	0.58	0.01	0.05
<b>P8</b>	437.00	93.75	37.00	27.02	1.70	0.24	2.20	0.58	0.75	0.05
<b>P9</b>	540.50	64.35	65.00	16.97	1.45	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabella 6. Caratteristiche dei profili trasversali esaminati. classificazione e tipologia di distribuzione di ogni variabile come riportato in tabella 4.

e descrivono la probabilità di accadimento di 5 anni di ogni variabile. L’onda massima in 5 anni segue questa distribuzione:

$$P(H_s, \max \leq H) = F(H_s, \max) = \exp(-\exp(-\beta(H-\alpha)))$$

dove  $\alpha=4.0$  e  $\beta=2.2 \text{ m}^{-1}$ .

Come indicazione, una distribuzione Gaussiana si assume con media  $45^\circ$  e deviazione standard  $15^\circ$ .

La scarsa correlazione tra marea e altezza delle onde è descritta da una distribuzione Gaussiana di livello mareale, con media  $\mu(H_s)=0.12 (H_s - 1) \text{ m}$  e deviazione standard  $\sigma=0.26 \text{ m}$ .

La correlazione tra il periodo di picco ( $T_p$ ) e l’altezza ( $H_s$ ) è descritta semplicemente trasformando il sistema di coordinate e assumendo una assenza di correlazione tra l’altezza d’onda e la ripidità ( $s_{op}=H_s/L_{op}(T_p)$ ). La media e la deviazione standard dei parametri usati per descrivere il profilo della spiaggia sono riportate in Tabella 6.

La subsidenza ha una piccola influenza su un orizzonte temporale di 5 anni, ma dal momento che può essere parzialmente controllata da un’appropriata gestione della costa è importante sottolineare i suoi effetti anche nel breve termine. A questo scopo, si assume di solito uno scenario, con subsidenza media di  $2 \text{ mm/anno}$  che può variare tra  $1$  e  $4 \text{ mm/anno}$ . In aree in cui le dune sono assenti, l’altezza della duna si considera essere un valore deterministico equivalente a zero. Finché tutte queste quantità sono intrinsecamente positive, si assume una loro distribuzione Log-normale.

Poiché la geometria del profilo è descritta direttamente, l'effetto della protezione costiera non è spiegato specificatamente. L'effetto sulla trasformazione dell'onda è considerato tramite un coefficiente di trasmissione con distribuzione gaussiana  $k_t$ . Esso vale 0.6 per una moderata protezione come la barriera sommersa e 0.4 per una grossa protezione come la barriera emersa (la deviazione standard vale 0.15 in entrambi i casi). Ovviamente in assenza della protezione della spiaggia  $k_t$  è un valore deterministico pari a 1.

La probabilità di inondazione in 5 anni è calcolata in presenza e assenza della duna e per tre diversi gradi di protezione costiera lungo tutti i profili semplificati (vedi Tabella 7).

		<b>PF</b>		
		<b>Defence Structures</b>		
	<b>Profile type</b>	<b>Absence</b>	<b>Submerged</b>	<b>Emerged</b>
<b>without dune</b>	P1	98.54		
	P2	99.96		95.08
	P3	16.54		0.84
	P4	67.97		
	P5	58.54	23.26	7.53
	P6	58.54	31.51	9.88
	P7	80.22		
	P8	97.56		
	P9	58.91		5.69
<b>with dune</b>	P1d	31.54		
	P2d	49.22		3.25
	P4d	8.00		
	P5d	0.61	0.10	0.04
	P6d	9.02	2.97	0.87
	P7d	0.84		
	P8d	32.18		25.04
	P9d	0.00		

Tabella 7. Flooding probability (probabilità di inondazione) PF lungo la costa con e senza dune per i profili trasversali di Figura 3. PF è calcolata considerando anche la presenza di strutture emerse o sommerse.

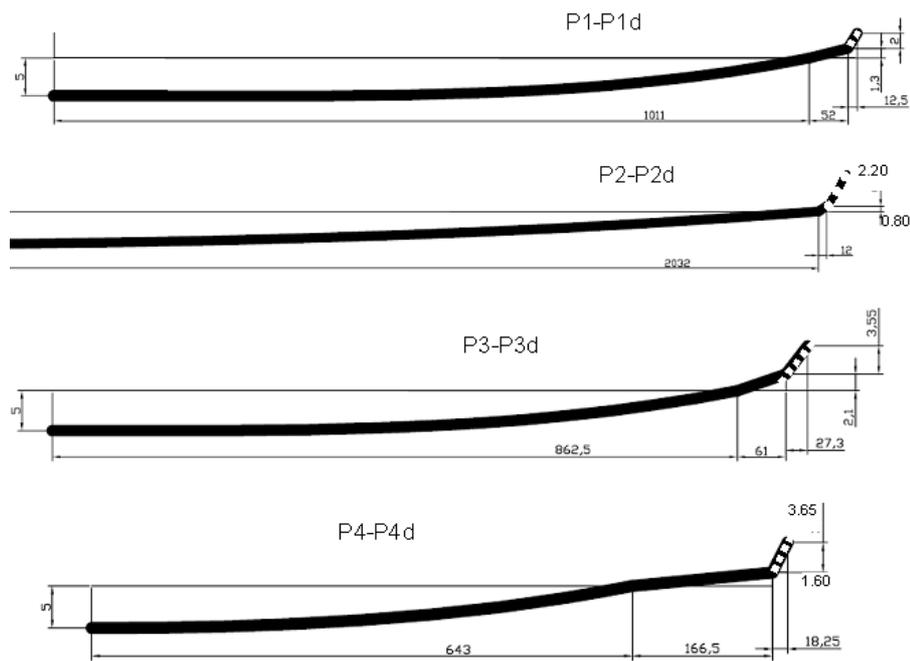


Figura 3. Tipici profili trasversali lunga la costa dell'Emilia Romagna.

I risultati a cui si perviene sono mappe sul genere della seguente:

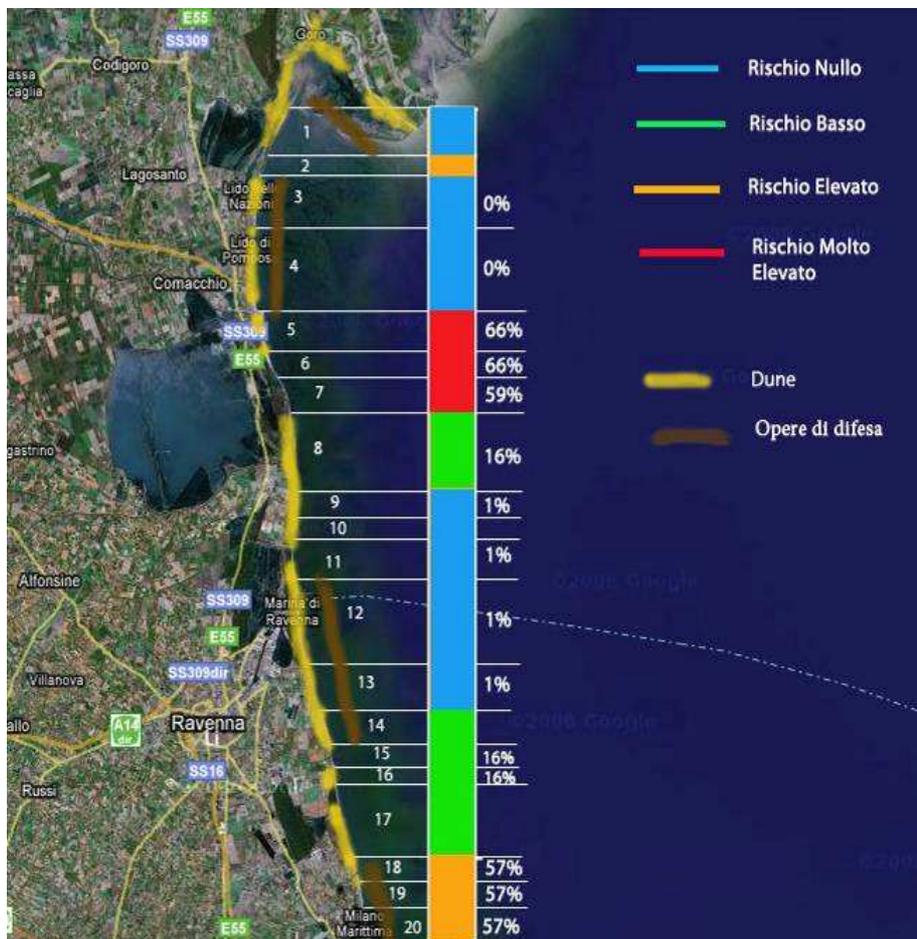


Figura 4. Confronto tra il livello di rischio ottenuto con il metodo EUROSION (2004) e con il metodo quantitativo monodimensionale.

## **2.2 Scenari di cambiamento climatico e conseguenze nelle aree costiere**

Si è raggiunto ormai un generale consenso sul fatto che il cambiamento climatico sarà un problema sempre più sentito in futuro a causa degli effetti del riscaldamento globale indotti dalle emissioni derivanti da attività umane, come gas serra quali l'anidride carbonica e altri. L'aumento del livello medio del mare è l'aspetto principale da considerarsi quando si parla di rischio delle zone costiere. Inoltre, esistono anche gli effetti del cambiamento della velocità del vento e relativi effetti sulla frequenza e intensità delle tempeste. Il cambiamento climatico porta ad un aumento dei carichi idraulici sulle difese costiere che proteggono la popolazione e le attività.

Infine, gli effetti dell'innalzamento del livello del mare portano ad un aumento del tasso di erosione costiera e alla perdita di aree umide, che potrebbe inoltre ridurre la capacità di protezione dall'inondazione.

Le emissioni future di gas serra e i relativi impatti sul riscaldamento globale e il cambiamento climatico sono molto incerti. Per questa ragione, gli aspetti rilevanti del cambiamento climatico vengono di solito analizzati considerando diversi scenari di cambiamento climatico. Nello sviluppare tali scenari, viene fatta una distinzione tra gli scenari stimati basati su ricerche scientifiche e quelli applicati nelle politiche di gestione delle zone costiere .

Per quanto riguarda i primi, ci sono forti evidenze che il livello del mare è gradualmente cresciuto durante il XX° secolo e che sta attualmente crescendo. Si pensa che il livello del mare aumenti ancora fino a raggiungere tassi di crescita ancora maggiori in questo secolo. Le due maggiori cause dell'innalzamento globale del livello del mare risiedono nella dilatazione termale degli oceani (l'acqua si espande se scaldata) e nella perdita di ghiacci terrestri dovuta al crescente scioglimento.

Il completo scioglimento della copertura di ghiaccio delle Groenlandia potrebbe in totale portare ad un innalzamento del livello del mare di 6 o 7 metri (anche se stanno emergendo stime inferiori a causa degli effetti della gravitazione). Questo scioglimento richiederebbe tuttavia molti secoli. Il contributo che lo scioglimento della copertura glaciale della Groenlandia ha dato all'innalzamento del livello marino è stato stimato come zero nell'ultimo secolo. Ci si aspetta che il volume del ghiaccio della Groenlandia cali nei prossimi secoli e che il contributo all'innalzamento del livello marino sia non superiore ai 9 centimetri.

Per quanto riguarda invece le politiche di gestione delle zone costiere, esse si servono dei diversi scenari comunemente per:

- incoraggiare e guidare la ricerca e gli sforzi nella modellazione;
- giustificare le modifiche ai progetti ingegneristici;
- alterare la pianificazione dell'uso delle terre per assecondare la crescita del livello del mare;

- sviluppare valutazioni di impatto per aiutare i politici a decidere i livelli appropriati di attenzione giustificati dal problema del cambiamento climatico.

La maggior parte dei problemi di erosione costiera sono indotti dalla presenza delle attività umane e dalla costruzione di infrastrutture costiere che stanno progressivamente invadendo i litorali e le scogliere. Diversi ecosistemi stanno gradualmente scomparendo a causa della mancanza di sedimenti. In molti posti il responsabile di questo fenomeno è il sovra-sfruttamento della costa.

Un'accelerazione nella crescita del livello del mare aggraverà ampiamente il fenomeno di erosione delle spiagge in tutto il mondo, nonostante la risposta locale dipenda dalla disponibilità di sedimenti. Il modello di Bruun suggerisce che la recessione della linea locale di costa sta nel range di 50-200 volte la crescita del livello marino, ma il modello talvolta fallisce sotto circostanze meno ideali.

Una indiretta e meno frequentemente esaminata influenza della crescita del livello del mare sulla quantità di sedimenti nelle spiagge è dovuta al riempimento delle baie e dei bacini costieri. Come il livello marino cresce, gli estuari e le lagune tentano di mantenere l'equilibrio aumentando l'elevazione del loro letto e quindi potenzialmente agire da bacino di sabbia. Gli estuari, le lagune e i bacini di marea soffriranno di insufficienza di sedimenti dovuta ad una crescita nel livello del mare, e di conseguenza aggraveranno l'erosione delle coste adiacenti.

Basandosi sugli studi effettuati in zone soggette ad inondazione come quelle affacciate sul Mare del Nord, risulta appropriato ed economicamente attuabile, ridurre il rischio da inondazione investendo nella gestione delle zone costiere. Per mitigare praticamente l'incremento del rischio da inondazione, le strategie di gestione delle zone di costa dovrebbero consistere in un mix di tre diversi tipi di misure:

- 1) rinforzo delle difese;
- 2) strategie di pianificazione per le aree inclini all'inondazione come la zonizzazione delle restrizioni sulla costruzione edilizia, la divisione delle zone soggette ad inondazione in diversi comparti, la rete delle vie di fuga, polizze assicurative per gli abitanti ecc..;
- 3) la realizzazione di una organizzazione interregionale per le calamità con particolare riguardo agli allarmi preventivi da inondazione, comunicazione del rischio di inondazione, evacuazione, cure mediche, gestione del dopo crisi e compensazione delle perdite.

In termini generali, l'area costiera è un mosaico di diversi tipi di utilizzo del suolo tra cui aree densamente sviluppate per uso solo residenziale o di vacanza; aree sviluppate industrialmente; e aree più naturali come i pascoli e le saline. Si sente dunque la necessità di differenziare le strategie di azione per ogni area predisposta all'inondazione, a seconda dello specifico uso del suolo e delle sue caratteristiche di difesa dall'inondazione stessa. I potenziali impatti dell'evento di inondazione potrebbero includere danni economici che possono essere definiti in termini monetari, così come la rottura sociale delle comunità (incluse le vittime) o la perdita dei valori intrinseci della conservazione delle aree, cose generalmente difficili da quantificare in termini monetari.

L'uso dell'analisi costi-benefici può assistere il processo decisionale per le strategie di gestione costiera ai fini della riduzione del rischio. È importante notare che, oltre alle considerazioni delle specifiche strategie e soluzioni da utilizzarsi per ogni area di costa, c'è un bisogno implicito di sviluppare una visione più ampia della gestione del rischio costiero da una prospettiva di pianificazione di più larga scala (anche a scala nazionale). Per questo l'analisi della valutazione del rischio deve essere condotta a diverse scale temporali e geografiche, tenendo in considerazione il potenziale di sviluppo nel lungo termine e le varie interazioni tra le diverse parti del sistema costiero.

## **2.3 Mitigazione del rischio**

Per permettere lo sfruttamento delle aree costiere, sia turistico che abitativo che economico, è necessario che le amministrazioni locali si scontrino con il problema della mitigazione del rischio da inondazione e da erosione che colpisce la maggior parte delle coste, in particolare quelle Emiliano-Romagnole. Mitigare il rischio significa sostanzialmente servirsi di metodi che possano ridurre il rischio stesso; come metodi si intende un'azione sia a livello pianificativo sia l'adozione di nuove tecnologie.

### *2.3.1 Le “porte Vinciane” in Europa*

Fin dai tempi più antichi, uno degli strumenti utilizzati per lo sbarramento del flusso dell'acqua erano le “porte Vinciane”.

Queste porte, o chiuse, anche dette “porte a vento”, sono ancorate su robusti pilastri a cuneo (fig. 5). Si aprono utilizzando la sola forza dell'acqua che, da un punto di maggior altitudine, durante la bassa marea, scende verso il mare consentendone lo scolo. In caso di alta marea, la forza dell'acqua che sale fa sì che le porte si richiudano, evitando così che l'acqua salata del mare risalga il corso dei canali interni che si vogliono proteggere e arrivi quindi ai terreni circostanti.

Ad oggi le porte vinciane sono azionate solitamente da cilindri oleodinamici e sono dotate di rilevatori di marea così da regolarne l'apertura e la chiusura in automatico.

Nel caso specifico della città di Cesenatico, le porte sono state installate nel tratto finale del porto canale in modo da prevenire il rischio di inondazione del centro storico in casi di alta marea. La loro localizzazione lontana dal centro storico è finalizzata al preservare il valore storico-architettonico del paesaggio e a raccordare l'opera stessa alla difesa del litorale. Esse sono state progettate per fermare una marea alta fino a 2.20 metri sopra il livello del mare.

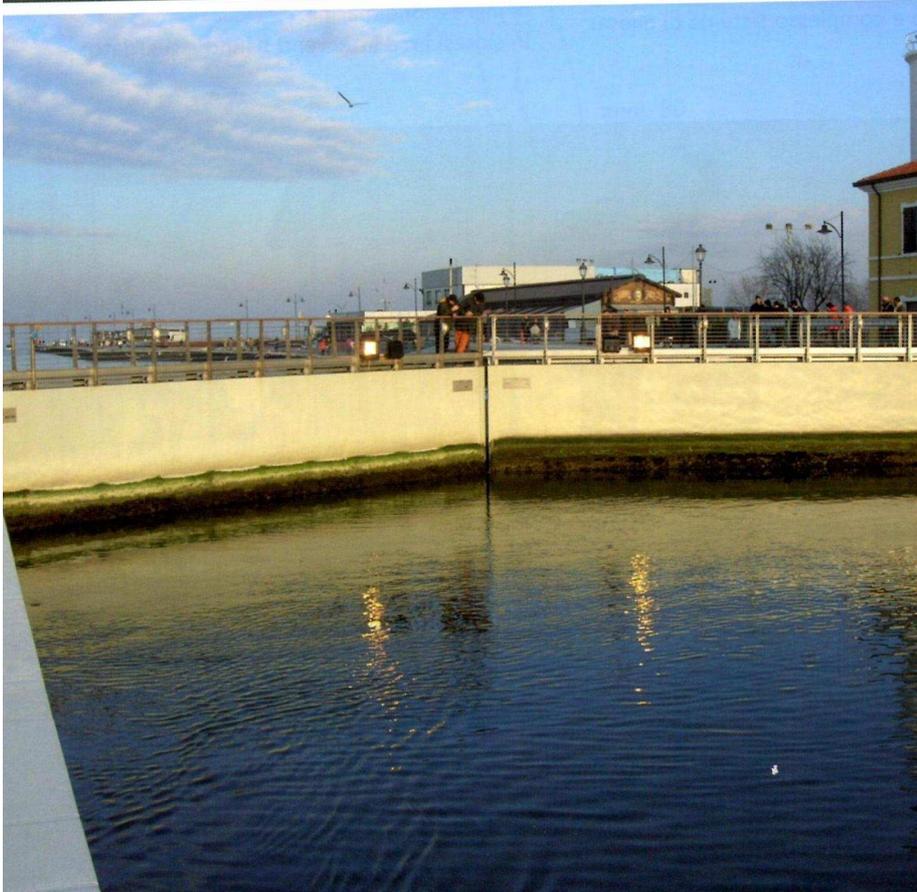


Fig. 5 Porte vinciane

Il caso delle porte Vinciane di Cesenatico è solo uno dei tanti esempi di applicazione dell'ingegneria per lo sbarramento del flusso d'acqua.

Come si sa, il paese più interessato dal fenomeno dell'inondazione è ovviamente quello dei Paesi Bassi che, trovandosi al di sotto del livello del mare, ha dovuto sviluppare nel tempo tecnologie sempre più sofisticate per salvaguardare la vita sulla terraferma. L'area a sud dei Paesi Bassi infatti è casa per quattro milioni di abitanti e la perdita di vite umane per un'inondazione qui sarebbe elevatissima perché c'è pochissimo tempo per allarmare la popolazione in caso di tempesta dal Mare del Nord.

Tra il 1950 e il 1997 sono stati realizzati una serie di barriere nei Paesi Bassi per proteggere una vasta area a sud-ovest degli stessi dall'inondazione da mare (vedi figura 6). Tali progetti consistono in dighe, paratoie, canali e barriere. Lo scopo di tali infrastrutture era quello di accorciare la linea di costa così da ridurre il numero di dighe da costruire.



Fig. 6 Protezioni contro l'inondazione da mare nei Paesi Bassi. (Wikipedia.org)

Gli estuari dei fiumi Rhine, Meuse e Sheldt sono stati soggetti a diversi eventi di inondazione lungo i secoli. Dopo l'inondazione del Mare del Nord del 1953 fu instaurata una commissione che dovesse stendere un piano che ne ricercasse le cause e stabilisse le misure per prevenire altri disastri nel futuro. Vennero rivisitati alcuni dei vecchi piani e ne fu steso uno nuovo col nome di "Piano Delta". Tale piano consisteva nel bloccare gli estuari di Oosterschelde, Haringvilet e Grevelingen. Questo ridusse la lunghezza delle dighe esposte a mare di circa 640 km.

La costruzione di infrastrutture di questo calibro ha incontrato non pochi ostacoli nelle fasi operative perché ha dovuto scontrarsi con diversi portatori di interesse. Ad esempio, l'estuario Oosterschelde che originariamente doveva essere trasformato in un lago, non poteva più essere utilizzato come area di pesca delle ostriche. Ciò ha portato gli

ambientalisti e i pescatori a fare pressioni sul parlamento in modo che si apportassero modifiche al progetto. Modifiche che poi furono ottenute. Invece che la chiusura completa dell'estuario si sarebbe costruita una barriera contro le tempeste; tale barriera esiste ancora oggi ed è composta di 62 porte in ferro, ognuna alta 42 metri. Tale diga è stata pensata per resistere più di 200 anni ed è la barriera più larga di tutte le tredici costruite (fig. 7).



Fig. 7 Diga di Oosterschelde. (Wikipedia.org)

L'ultimo passo del "Piano Delta" era la costruzione della barriera di Maeslant, pensata per proteggere dall'inondazione da mare il porto di Rotterdam. Questa costruzione doveva essere collocata nella via di navigazione di Nieuwe Waterweg. Ciò ha giocato un ruolo importante nella fase di pianificazione poiché questa via di navigazione era quella principale che conduceva al porto di Rotterdam, al tempo il più grande al mondo. Inoltre una barriera come quella di Oosterschelde non poteva essere costruita perché avrebbe bloccato completamente la navigazione. Il progetto che vinse l'appalto consisteva in due enormi cancelli galleggianti posti su entrambi i lati della via navigabile. Un vantaggio di questo progetto era che la sua costruzione poteva essere eseguita in condizioni di secca, con porto asciutto. Inoltre, nessuna parte mobile della struttura si sarebbe collocata sotto acqua, di modo che anche la sua manutenzione sarebbe risultata più semplice. E, ovviamente, non ci sarebbero stati inconvenienti per il passaggio delle navi (fig. 8).

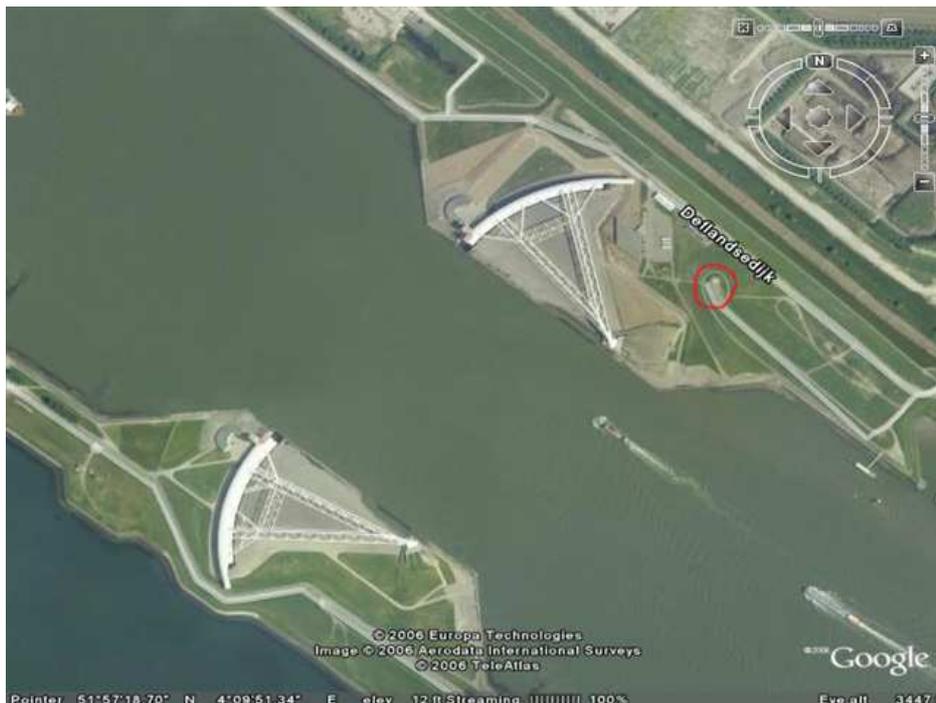


Fig. 8 Barriera di Maeslant. (Wikipedia.org)

La costruzione della barriera cominciò nel 1991 e fu terminata nel 1997. I cancelli sono alti 22 metri e lunghi 210 metri.

In caso di condizioni meteorologiche normali le due porte sono ben protette nei loro moli e i 360 metri di spazio lasciano libero passaggio a tutte le navi senza alcun inconveniente. Quando poi si prevede una tempesta che porti il livello del mare a 3 metri sopra quello statico, le porte si chiudono automaticamente, essendo esse stesse collegate ad un computer che recepisce i dati meteorologici.

Ci si aspetta che questa barriera venga chiusa una volta ogni 10 anni a causa di storm surge.

Un altro caso di barriera costruita per salvaguardare dall'inondazione è quello della città di Londra. La barriera sul Tamigi (fig. 9) è la seconda barriera mobile più larga del mondo.

Londra è piuttosto vulnerabile alle inondazioni; una tempesta generata dalla bassa pressione nell'oceano Atlantico potrebbe deviare verso est ed essere condotta verso le acque basse del Mare del Nord. La tempesta si incanala nel Mare del Nord che confina con l'estuario del Tamigi. Se la tempesta poi coincide con lo spring-tide si possono pericolosamente verificare alti livelli nel fiume Tamigi stesso. Questa situazione, combinata con il flusso verso mare del fiume scatena la necessità di sistemi di difesa da una possibile inondazione.

Storicamente, ci fu una inondazione nel 1928 che portò alla morte di 14 persone mentre 307 morirono dopo l'inondazione per la tempesta del mare del Nord. Da questo momento il problema acquistò maggiore importanza e fu oggetto di studi.

I lavori per la costruzione di questa barriera iniziarono nel 1974 e furono completati nel 1982.

La barriera divide il fiume in quattro passaggi larghi 61 metri e due larghi 30.



Fig. 9 Barriera sul Tamigi. (Wikipedia.org)

I cancelli si aprono per rotazione e sono pieni di acqua quando sommersi mentre vengono svuotati al momento della chiusura. La barriera si chiude quando si prevede un livello di oltre 4.87 metri a Londra centro. Nove ore prima dell'arrivo dell'alto livello d'acqua una serie di messaggi avvisano il traffico navale di arrestarsi. Dopodichè i cancelli sono liberi di chiudersi.

Dal 1982 la barriera è stata chiusa cento volte.

In generale, comunque, le barriere proteggono una vasta area di entroterra e di zona costiera. Tuttavia occorre anche tenere presente che i costi di costruzione sono sempre molto elevati; inoltre sono anche ecologicamente dannose in quanto vanno a modificare o, spesso, ad eliminare gli ecosistemi esistenti apportando cambiamenti alle condizioni di apporto di sedimenti, di salinità, di percentuale di zone secche e umide..

Infine rimane sempre l'incognita del malfunzionamento delle barriere.

### 2.3.2 Concetti integrati

Alla luce di quanto fin'ora detto, nella progettazione di opere per la protezione del litorale, dunque per la mitigazione del rischio da inondazione ed erosione, è sempre più spiccata l'esigenza di considerare vari aspetti, oltre a quelli meramente ingegneristici, al fine di ottenere strutture che perseguano l'obiettivo di svolgere la funzione per cui sono state pensate ma sempre nel rispetto dell'ambiente e delle condizioni socio-economiche. A questo scopo è nata la nuova concezione della progettazione integrata, ovvero una progettazione finalizzata alla protezione del litorale che miri a soddisfare le esigenze dei diversi settori coinvolti ma con il minimo impatto ambientale possibile. Dunque, lo sviluppo della progettazione integrata richiede la collaborazione di una varietà di specialisti nei più svariati campi, da quello ingegneristico a quello ambientale e gestionale. Si avverte l'esigenza di lavorare insieme al fine di perseguire un obiettivo comune considerando i vari problemi locali nell'ambito costiero e i rischi ad essi connessi, ponendosi sempre in una prospettiva spaziale e temporale il più ampia possibile.

In generale, lo sviluppo delle strategie di protezione costiera comprende i seguenti passi:

- 1) specifica degli scenari regionali;

- 2) definizione del problema e identificazione delle possibili misure di protezione;
- 3) analisi e valutazione delle diverse alternative.

Gli scenari regionali dovrebbero fornire informazioni dettagliate rispetto a:

- la traslazione regionale dei vari aspetti del cambiamento climatico;
- gli sviluppi infrastrutturali basati su uno specifico potenziale di sviluppo regionale; piani esistenti; priorità di sviluppo;
- la conoscenza dei sistemi di protezione dall'inondazione già pianificati.

La definizione del problema sta nello specificare l'estensione dei rischi costieri futuri e la valutazione del rischio da inondazione per i diversi scenari regionali. Questo fornirà le basi per l'identificazione delle misure possibili e delle strategie per affrontare le sfide future.

Oltre alla applicazione e al miglioramento delle già esistenti forme di difesa (come le dighe, i moli, le barriere e le diverse forme di ripascimento) la gestione del rischio costiero futuro dovrebbe mirare alla definizione di misure di adattamento di tali difese. Questa opzione potrebbe includere misure per ridurre i carichi idraulici, misure per stabilizzare le zone di difesa dall'inondazione con usi multifunzionali e misure per ridurre la vulnerabilità delle zone soggette all'inondazione.

La fattibilità di certe misure di protezione dipende da diversi fattori relativi alle caratteristiche naturali e socio-economiche delle zone di costa, dal sistema di protezione già esistente, dal contesto di gestione costiera (inteso come influenzato dalle condizioni politiche, istituzionali e culturali).

In ultimo, l'analisi e la valutazione delle diverse alternative dovrebbe essere basata su varie combinazioni di misure promettenti, andando a formare una strategia vera e propria; ogni strategia deve rappresentare un mix logico e coerente di misure. L'analisi delle strategie include la valutazione degli impatti rilevanti (in termini di costi sociali e benefici) della protezione considerata e della gestione di tale strategia. Ai fini di considerare le varie incertezze, gli impatti di una possibile strategia devono essere considerati per ogni diverso scenario regionale. La valutazione delle strategie dovrebbe essere basata sulla comparazione di strategie per ogni scenario. Tale valutazione non dovrebbe mirare a selezionare la 'migliore' strategia in un dato scenario, ma piuttosto a identificare la strategia più 'robusta' (in termini di conciliazione dei vari obiettivi o ottenimento di benefici) per ogni scenario. Quindi, l'obiettivo primario della valutazione dovrebbe essere di minimizzare il rischio nella selezione di una strategia forte.

Nel caso specifico della regione Emilia Romagna, il recepimento delle direttive europee in merito ad una progettazione integrata è avvenuto tramite il progetto GIZC, cioè Gestione Integrata delle Zone Costiere. E' il progetto a più alta valenza strategica condotto dalla regione nell'ultimo decennio, ed è fondato sul principio che una prospettiva di sviluppo a lungo termine deve basarsi sulla gestione sostenibile del territorio e delle sue risorse e non può prescindere dalla comprensione delle dinamiche e dei processi che regolano i sistemi naturali.

Esso ha inoltre rappresentato uno dei progetti più avanzati sul piano dell'integrazione intersettoriale e di sostenibilità ambientale facendo cooperare nove settori tematici.

Il risultato finale è stata l'approvazione delle linee guida da parte del Consiglio Regionale che sono state poi recepite da parte degli enti locali operanti nella costa.

Nell'ambito della difesa della costa le linee guida perseguono questi obiettivi:

- la gestione integrata del litorale, l'organizzazione e l'approfondimento delle conoscenze;
- la rimozione o mitigazione delle cause di erosione delle spiagge e di ingressione marina, quali per esempio la riduzione della subsidenza e il ripristino del trasporto solido dei fiumi;
- la difesa e riqualificazione delle spiagge, favorendo la salvaguardia dei territori ancora naturali e potenziando la difesa delle spiagge attraverso le tecniche di rinascimento, superando l'uso spregiudicato delle difese rigide.



# CAPITOLO 3

## La costa dell'Emilia Romagna

### 3.1 Clima del moto ondoso



Fig 1 Litorale emiliano-romagnolo

Per individuare la dinamica litoranea e, di conseguenza, la modificazione all'assetto morfologico delle spiagge basse e sabbiose che caratterizzano la costa dell'Emilia Romagna (figura 1), occorre definire le condizioni del moto ondoso incidente. Esso, infatti, è la base per

definire il regime idrodinamico sottocosta e conseguentemente il trasporto solido litoraneo.

Le condizioni del moto ondoso medie, siano esse annue e/o stagionali, sono responsabili dell'evoluzione dei litorali a lungo termine, attraverso, essenzialmente, il regime delle correnti lungo riva e del conseguente trasporto dei sedimenti. La conoscenza dei fenomeni estremi è invece necessaria per il corretto dimensionamento degli interventi lungo la costa, per verificare fenomeni erosivi e le variazioni lungo il profilo della spiaggia.

Nell'ambito della redazione del "Piano Costa 1996" una apposita analisi dei dati meteomarini, allora disponibili, ha consentito di definire il clima del moto ondoso al largo, ovvero la frequenza degli eventi suddivisi per altezza d'onda, direzione di provenienza e periodo.

Relativamente al regime del moto ondoso, al 1996, le varie fonti informative disponibili erano rappresentate da: osservazioni dalle piattaforme AGIP, tra cui anche una posizionata a circa 20 km al largo di Ravenna; osservazioni raccolte dall'Istituto Meteorologico Reale Olandese; osservazioni strumentali davanti al Delta del Po.

Successivamente, nel 1999, entrò a far parte della Rete Ondametrica Nazionale (RON) la boa di Ancona (Fig. 2), collocata in corrispondenza di un fondale di 50 m, a circa 22 km dalla costa.



Fig 2 Boa installata ad Ancona per il rilievo del moto ondoso

In seguito è stata spostata per motivi di gestione a 27 km dalla costa su un fondale di 70 m. Il punto in cui è collocata la boa è caratterizzato da un fetch geografico le cui lunghezze maggiori sono quelle da sud-est e da nord-est. I rilevamenti acquisiti dalla boa erano cadenzati ogni 3 ore prima e ogni 30 minuti in seguito.

Dai dati registrati dalla boa di Ancona tra il 2000 e il 2006 sono stati ricavati gli eventi che possono classificarsi come mareggiate secondo la definizione riportata dall'Atlante delle onde, e cioè: successione di stati ondosi in cui l'altezza d'onda è stata maggiore a 1 m per almeno 12 ore, eventuali periodi di attenuazione dell'onda sotto questa soglia lunghi non più di 6 ore, direzione di provenienza dei vari stati ondosi ricompresi all'interno di un range più o meno 30°, rispetto alla direzione di origine.

In ragione della disposizione geografica i mari di Nord-Ovest e Sud-Ovest non influenzano la dinamica del litorale emiliano romagnolo. Pertanto, ai fini dell'analisi del regime e dell'assetto della costa regionale è opportuno prendere in esame solo gli eventi che provengono dai mari di Nord e Nord-Est (bora e grecale), Sud-Est (scirocco).

Dall'analisi dei dati risulta che durante il periodo gennaio 2000-marzo 2006 si sono registrati 218 eventi classificati come mareggiate. Le mareggiate così identificate hanno comportato quasi 340 giorni di mare mosso. Su un totale di 160 mareggiate provenienti da questi due quadranti, il II° quadrante ( $90^\circ < N < 180^\circ$ ) è stato interessato dal maggior numero di eventi, pari a 117, mentre dal I° quadrante ( $0^\circ < N < 90^\circ$ ) sono pervenute 42 burrasche. Tra le 160 mareggiate, 59 di queste, pari a circa il 37%, hanno avuto una durata massima di un giorno, mentre 84 eventi, pari al 52% dei casi, sono stati caratterizzati da una persistenza di non più di 3 giorni consecutivi. Mareggiate di più lunga durata dell'ordine della decina di giorni, possono considerarsi eventi molto rari.

Per quanto riguarda il dato sull'altezza media delle onde nei vari aventi del periodo in esame, la maggior parte si è attestata nell'intervallo tra 1,2 m e 1,7 m; una certa rilevanza è data dalle mareggiate con altezza d'onda media attorno ai 2 m che hanno rappresentato oltre il 7% dei casi registrati dalla boa di Ancona.

Un esempio di rappresentazione della direzione di provenienza del moto ondoso rilevato nella boa di ancona nel periodo 1990-2009 è riportato nella figura seguente:

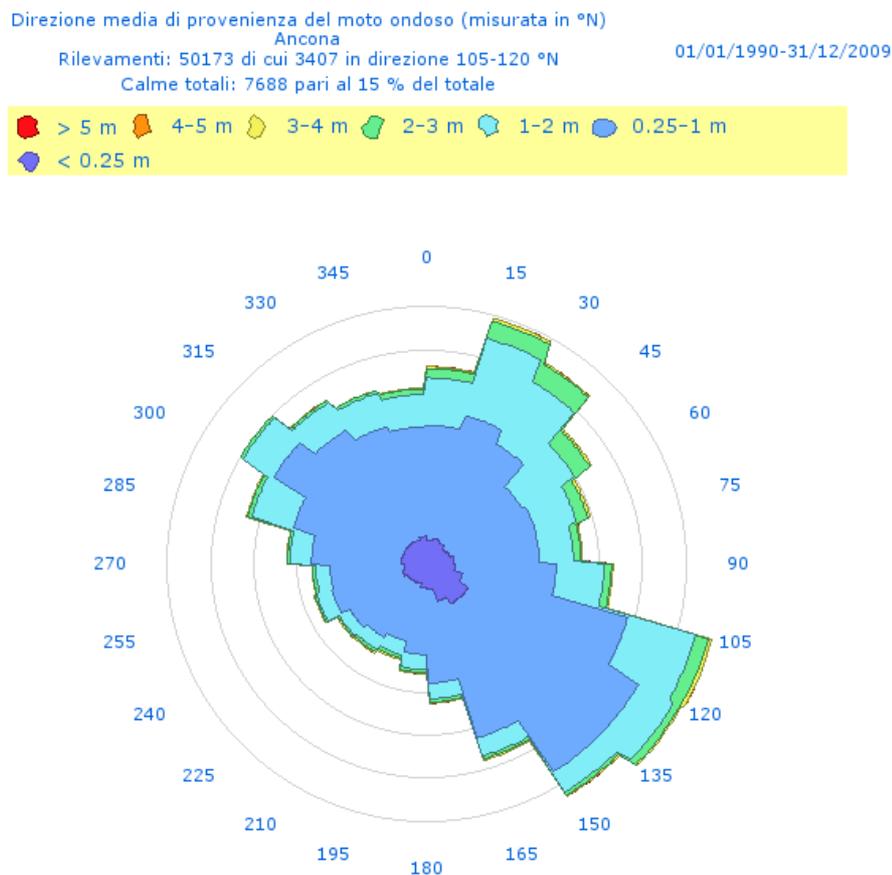


Fig 3 Direzione media di provenienza del moto ondoso ad Ancona.  
(www.idromare.it)

Oltre alla boa di Ancona è stata installata la boa di Punta della Maestra ma, nel complesso, si evince che il quadro sulla disponibilità di misure di moto ondoso nel bacino settentrionale del Mare Adriatico è caratterizzato, da un lato, da una relativa abbondanza di dati con una distribuzione spazio-temporale alquanto disomogenea, dall'altro, dalla totale mancanza di dati onda metrici recenti, rilevati davanti alle coste della Regione Emilia Romagna.

L'occasione per colmare questa lacuna è stata offerta dal progetto europeo Beachmed-e, in particolare nel sottoprogetto denominato "NAUSICAA", nell'ambito del quale la Regione si è posta l'obiettivo di installare una specifica boa di misura. Il sito in cui è stata collocata la boa si trova 8 km al largo di Cesenatico su un fondale di circa 10 m; i dati vengono acquisiti ogni 30 minuti.

### **3.2 Descrizione della morfologia della costa**

La costa dell'Emilia Romagna si sviluppa per circa 170 km e presenta caratteristiche morfologiche comuni alla sua intera estensione, salvo riscontrare peculiarità tipiche degli ambienti deltizi in corrispondenza delle numerose foci fluviali. La costa emiliano romagnola, infatti, si individua come quella porzione costiera compresa tra il delta del fiume Po e il promontorio di Gabicce, che segna appunto il confine geografico tra Emilia Romagna e Marche.

Percorrendo questa fascia costiera si incontra un primo ambiente lagunare caratteristico del delta del Po, con estensione di circa 15 km in cui si riconosce un'importante area lagunare protesa verso mare per circa 10 km rispetto all'andamento del successivo tratto di costa ravennate.

La Costa del delta del Po è costituita da una sottile coltre di sabbie deltizie e litorali datate XVII secolo con locali intercalazioni di argille e limi di palude. Le dune sono diffuse e presenti lungo tutto il litorale, le spiagge sono discontinue e variabili in ampiezza tra i 10 e i 30 m, gli stabilimenti balneari sono assenti.

L'uso del suolo è rappresentato in gran parte da aree naturali vegetate e da zone umide diffuse; sono anche comuni terreni agricoli.

Gli attuali sistemi deposizionali costieri si sono sviluppati di recente, dal XIX secolo, e hanno dimostrato una forte dinamicità legata all'attività della foce del Po.

L'unità costiera successiva è la costa ravennate, che si estende per circa 60 km, ed è caratterizzata da una piana di sabbia costruita dai rami deltizi meridionali del delta del Po e dai fiumi appenninici. La sua morfologia è caratterizzata dalla diffusione di aree con quote poco superiori al livello del mare (tra 0 e 1 m.s.l.m) e ampi settori depressi corrispondenti alle "valli" ferraresi.

Nella fascia litorale sono presenti lagune e paludi e le dune sono frequenti e lateralmente discontinue raggiungendo uno sviluppo lineare del 60% circa sulla lunghezza complessiva della costa ravennate. Gli stabilimenti sono presenti a livello locale. L'uso del suolo è misto: aree

urbane, aree agricole, con vegetazione e zone umide sono variamente diffuse.

Le principali cuspidi deltizie sono, procedendo da Nord verso Sud, quella del fiume Reno, Fiumi Uniti, fiume Savio. La forma della costa è principalmente ondulata a causa della convessità delle cuspidi e della concavità dei piccoli golfi che si sviluppano tra queste. Attualmente è attiva una graduale tendenza di rettificazione della linea di riva, che consiste nell'erosione delle cuspidi e nell'accrescimento delle aree intercuspidi.

Lungo la costa ravennate sono riconoscibili elementi morfodeposizionali riconducibili tanto all'attività fluviale quanto all'azione delle onde, anche se i processi marini dominano su quelli fluviali. La prevalenza dei processi sedimentari marini ha costruito nel tempo una piana deltizia caratterizzata da un forte trasporto litorale verso Nord.

L'ultima unità costiera che si incontra procedendo verso sud è quella riminese. Questa si sviluppa per circa 50 km ed è caratterizzata da complessi di duna/spiaggia, in gran parte mascherati dal tessuto urbano, che hanno costituito una sottile striscia di litorale di circa 800-1000 m di ampiezza, che aumenta progressivamente verso Nord raggiungendo un massimo di circa 5 km. La costa riminese è limitata a Nord dal fiume Savio e raggiunge quote comprese tra i 2 e i 3 m.s.l.m che degradano nella parte settentrionale a partire da Gatteo Mare dove si osservano valori tra 0 e 2 m.s.l.m. Nei pressi di Cervia sono presenti tratti al di sotto del livello del mare. Il sottosuolo della costa riminese è caratterizzato da importanti sovrascorrimenti con complicati accavallamenti che interessano il substrato profondo. A queste strutture profonde sono associate risalite di acque minerali e termali.

Le geometrie della piana costiera e l'andamento della linea di riva sono relativamente stabili se considerate alla scala dei 1000 e dei 100 anni. Negli ultimi 50 anni variazioni locali sono in gran parte attribuibili alla costruzione delle difese costiere e dei porti.

Le evidenze morfologiche di dune sono attualmente rare o assenti a causa dei prelievi di sabbia per uso edilizio e allo spianamento delle stesse legato all'intensa urbanizzazione. Le spiagge sono lateralmente continue e ampie mediamente 80 m, con valori minimi inferiori ai 10 m e massimi di circa 170 m; esse sono caratterizzate dalla continua presenza di stabilimenti balneari.

La costa ha un andamento prevalentemente rettilineo con un'interruzione in corrispondenza dei porti di Rimini e Cesenatico dove assume la forma di un cuneo asimmetrico.

La presenza dei due porti influenza anche la morfologia del fondale, fungendo da trappola per il trasporto solido litoraneo che si accumula a ridosso del lato meridionale delle strutture, producendo così un deficit per i fondali posti a Nord.

Diversi fiumi appenninici attraversano la piana costiera e sfociano in mare; la maggior parte del carico di fondo proviene dai fiumi Marecchia e Rubicone e viene ridistribuito dalla deriva litorale verso nord che domina l'intera costa riminese. Il prevalere dei processi marini su quelli fluviali ostacola lo sviluppo delle cuspidi deltizie di questi fiumi.

### 3.3 Evoluzione della costa

La comprensione della dinamica della fascia costiera è un argomento di grande interesse per la maggior parte dei paesi che si affacciano al mare perché essa influisce non solo sulla stabilità dell'ambiente ma anche sull'assetto economico del territorio. La perdita di spiaggia, infatti, può determinare un elevato rischio in occorrenza delle mareggiate, provocare danni all'attività turistica e compromettere la fruibilità di un'area costiera.

Attraverso lo studio di una grande quantità di immagini del territorio disponibili dagli anni '40 in avanti si è condotta un'analisi che ha permesso di effettuare il confronto delle linee di riva, di elaborare mappe dell'uso del suolo e delle strutture morfo-deposizionali della spiaggia (emersa e sommersa), nonché di creare cataloghi informatici delle opere marittime e delle difese costiere.

I risultati di tali analisi evidenziano che fino alla seconda guerra mondiale gran parte della costa era caratterizzata da spiagge prive di infrastrutture urbane con ampie fasce di retrospiaggia in situazioni naturali accompagnate da un uso prevalentemente agricolo della piana costiera. I fiumi erano ben arginati anche se spesso avevano un ampio settore golenale lasciato libero alla divagazione del loro letto. A partire dagli anni '60 si è assistito ad una intensiva urbanizzazione della piana costiera con una progressiva occupazione anche dei litorali. Questo ha comportato una forte riduzione della naturalità degli ambienti di retrospiaggia e la distribuzione della duna costiera. Per contrastare la perdita di superficie di spiaggia, divenuta economicamente preziosa, e per proteggere le infrastrutture, sono state via via erette numerose opere di difesa la cui efficacia si è rivelata non sempre adeguata e ha talora prodotto complicazioni indesiderate come la migrazione dei punti di erosione della spiaggia e la scomparsa delle barre longitudinali.

Ai fini di una gestione ricreativa e turistica della spiaggia, tale perdita ha comportato l'uso massiccio di mezzi meccanici per la movimentazione di ingenti quantità di sabbia con conseguente perdita del profilo naturale. L'analisi condotta mostra chiaramente che i sostanziali cambiamenti della fascia costiera negli ultimi decenni sono stato il risultato dell'intervento invasivo dell'uomo, assieme a processi naturali di più lungo periodo. Tali cambiamenti sono da riscontrarsi anche nei processi sedimentari che sono stati fortemente condizionati dall'artificiale modificazione dei reticoli idrografici e dalla costruzione in alveo di strutture quali briglie, dighe ecc.. con la conseguente riduzione del trasporto solido dei fiumi. Inoltre la costruzione di opere di difesa marittime ha profondamente influenzato la dinamica del trasporto e la deposizione del sedimento, a scala sia locale che regionale.

Un ulteriore fattore antropico che ha contribuito all'evoluzione della linea di riva è la subsidenza, ovvero l'abbassamento del suolo legato a fattori sia naturali che antropici.

#### *3.3.1 Trasporto solido fluviale, erosione costiera, subsidenza ed eustatismo*

Come precedentemente anticipato diversi fattori hanno concorso negli anni alla modificazione della linea di riva. Il maggiore contributo del

materiale sedimentario delle spiagge proviene dagli apporti fluviali e tale contributo spesso risulta fondamentale sia nella formazione che nell'esistenza della spiaggia stessa. L'equilibrio della spiaggia è fortemente condizionato dalle variazioni del regime di trasporto sedimentario fluviale. Tali variazioni sono indotte da varie cause, sia di origine naturale che antropica.

La causa principale di modificazione del trasporto è naturale e si individua nell'alternarsi di diversi regimi pluviometrici. A questa occorre aggiungere le cause antropiche da riconoscersi nella regimazione dei corsi d'acqua, nel cambiamento dell'uso del suolo e nel prelievo di materiale litoide dagli alvei.

La riduzione del trasporto solido fluviale rappresenta la principale causa di erosione delle spiagge della regione Emilia Romagna. Lo studio condotto in occasione della redazione del "Piano Costa 1981" ha evidenziato una riduzione del trasporto alla fine degli anni '70 di 3-4 volte rispetto alle condizioni degli anni '40, in cui ancora i bacini fluviali non avevano subito le pesanti modificazioni dei decenni successivi. In occasione poi della redazione dell'aggiornamento del Piano Costa completato nel 1996, l'analisi delle informazioni raccolte ha permesso di individuare, in maniera qualitativa, le possibili tendenze evolutive del trasporto delle sabbie da parte dei corsi d'acqua. Gli effetti e i primi segni della ripresa del trasporto solido a mare da parte di alcuni fiumi sono stati percepiti in maniera evidente sulle spiagge di Cattolica, in quelle a Nord del fiume Marecchia e lungo lo Scanno di Goro. Lo studio ha permesso di stimare l'andamento nel tempo del fenomeno affermando che nella prima metà degli anni '50 i corsi d'acqua direttamente afferenti in Adriatico apportavano mediamente 2,1 milioni di t/anno di materiale sabbioso utile al rifornimento delle spiagge. Con l'inizio delle estrazioni del materiale litoide dagli alvei tale quantitativo si è ridotto fino a 0,6 milioni di t/anno nel 1985. Con l'arresto delle estrazioni è poi tornato a crescere fino a circa 1 milione di t/anno nel 1995. per il futuro si prevede un aumento del trasporto solido fino a 1,4 milioni di t/anno nel 2015 che dovrebbe portare ad un graduale riequilibrio naturale del bilancio sedimentario dei litorali.

Lo "stato del litorale emiliano romagnolo all'anno 2000" presenta valutazioni quantitative sugli apporti fluviali di sabbia che rappresentano una verifica delle stime quantitative fatte nel Piano Costa 1996. Le analisi condotte nei bacini regionali afferenti in Adriatico si è rilevato che sono presenti notevoli accumuli di materiale lapideo in corrispondenza delle opere idrauliche trasversali, a testimoniare un aumento del trasporto solido fluviale. Tuttavia, un'analisi condotta sui litorali non ha evidenziato un aumento del trasporto di materiale sabbioso a mare che fornisca un apporto positivo per i bilanci sedimentari in sofferenza delle spiagge regionali. Dunque è evidente come l'andamento climatico e la presenza diffusa di infrastrutture di regimazione idraulica lungo i tronchi montani dei corsi d'acqua rappresentino fattori di difficile valutazione nei casi in cui si voglia prevedere l'evoluzione di un fenomeno altamente variabile come il trasporto di sabbia da parte dei corsi d'acqua attraverso l'utilizzo di metodi statistici.

Sono indicate misure da adottare per facilitare il refluito del materiale ghiaioso e sabbioso; tali misure si riconducono principalmente alla rimozione delle opere di regimazione fluviale che hanno ormai esaurito il loro compito di regolarizzazione del fondo alveo, e a favorire la movimentazione del materiale dalla corrente idrica durante le piene.

L'effetto delle misure appena descritte potrebbe essere drasticamente limitato dal fatto che il controllo delle escavazioni ha portato ad una ripresa dei quantitativi di materiale lapideo presente in alveo. Inoltre la presenza di questo materiale a monte delle opere di regimazione è interpretata come un fattore di rischio idraulico e, dunque, viene affrontata con i mezzi tradizionali della concessione all'asportazione tramite escavazione limitando la possibilità di ripresa del trasporto solido verso valle durante gli eventi di piena.

Un altro fattore che contribuisce alla continua modificazione della fascia costiera, portando ad una trasformazione della linea di riva tramite fenomeni di erosione, è la subsidenza. Al momento della redazione del Piano Costa si era già consapevoli dell'influenza negativa che questo fenomeno esercitava sugli equilibri dell'area costiera ma si era impossibilitati a quantificarne l'entità e a definirne le cause. A quel tempo infatti (1980-1981) era disponibile una mole discreta di dati raccolti a partire dal 1950 nelle province di Ravenna e Ferrara, ma risultavano di scarso valore per le finalità del Piano in quanto interessavano prevalentemente aree di bonifica interne alla costa e soprattutto perché i capisaldi erano in posizioni ritenute non stabili. E' stata dunque istituita, su raccomandazione della Regione una apposita rete di misura della subsidenza lungo la fascia costiera regionale, vincolandola a riferimenti stabili. In seguito a ciò, con i successivi rilevamenti, la conoscenza del fenomeno migliorò moltissimo. E' stato così possibile definire con buona approssimazione la velocità di abbassamento del suolo per ogni tratto costiero e, grazie alla conoscenza, seppur parziale, della dislocazione dei giacimenti metaniferi prossimi alla costa, discriminare con l'andar del tempo i contributi al fenomeno dovuti all'estrazione di acqua e/o metano.

L'entità dei processi in atto, l'individuazione delle cause e la fragilità del sistema litoraneo regionale hanno spinto nell'ultimo decennio vari Enti e Istituti Universitari ad occuparsi del fenomeno anche mediante l'installazione di strumenti di misura molto sofisticati.

L'analisi dei movimenti è stata condotta tramite una campagna di livellazione integrata ad una analisi interferometrica che completa il quadro della situazione, fornendo una visione areale dei movimenti verticali del suolo.

Si veda nella figura successiva il trend dei movimenti verticali del suolo lungo il litorale:

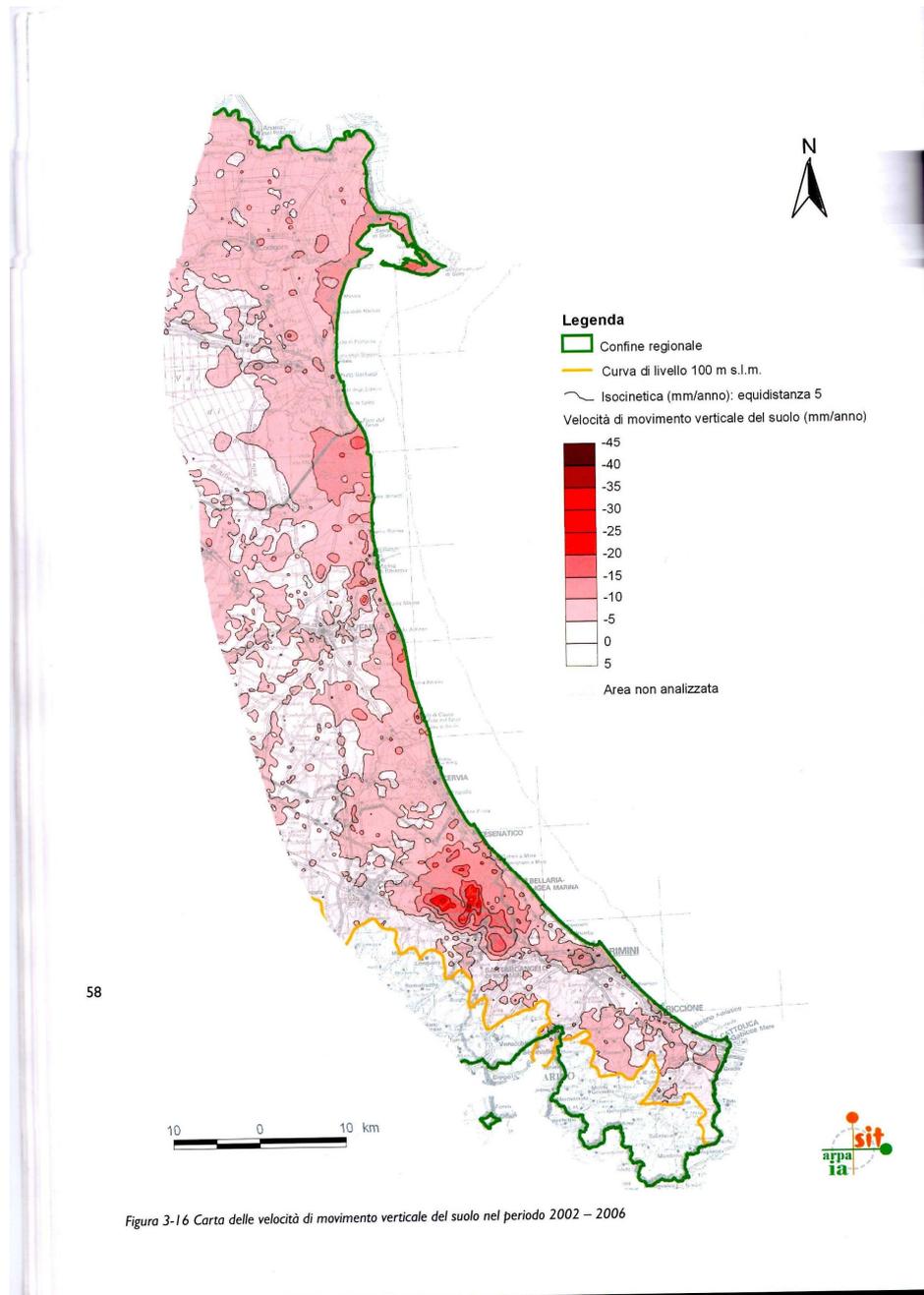


Fig. 4 Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2002-2006

L'osservazione dei movimenti verticali del suolo è stata condotta lungo le linee di livellazione situate immediatamente a ridosso del litorale. Procedendo da Sud verso Nord si osserva come il primo tratto di costa da Cattolica a Marebello sia caratterizzato da abbassamenti di 4-5 mm/anno, che risultano raddoppiati rispetto al trend del periodo precedente 1992-2000. Un comportamento simile lo si nota anche immediatamente più a Nord, nel litorale riminese, con abbassamenti generalmente intorno a 9 mm/anno, mentre nel periodo precedente non superavano i 6 mm/anno. Nel caso particolare di Rimini, i capisaldi posti nella zona industriale, quindi più arretrati rispetto alla costa, dimostrano che il trend appena descritto non è limitato alla sola linea prospiciente il litorale.

A Torre Pedrera si torna su abbassamenti più contenuti intorno ai 6 mm/anno, comunque in aumento rispetto ai valori precedenti. Procedendo verso Cesenatico gli abbassamenti aumentano progressivamente attestandosi a Bellaria intorno a 10 mm/anno mentre sul litorale compreso tra Cesenatico e Pinarella di Cervia si notano abbassamenti di poco inferiori a 7-8 mm/anno. Una tendenza più marcata all'aumento degli abbassamenti si rileva lungo l'intero tratto successivo fino a Marina di Ravenna, essendo presente a largo di quest'ultima una piattaforma dell'Eni finalizzata all'estrazione di metano.

Si veda nella seguente figura l'andamento del tasso di subsidenza a Cesenatico:

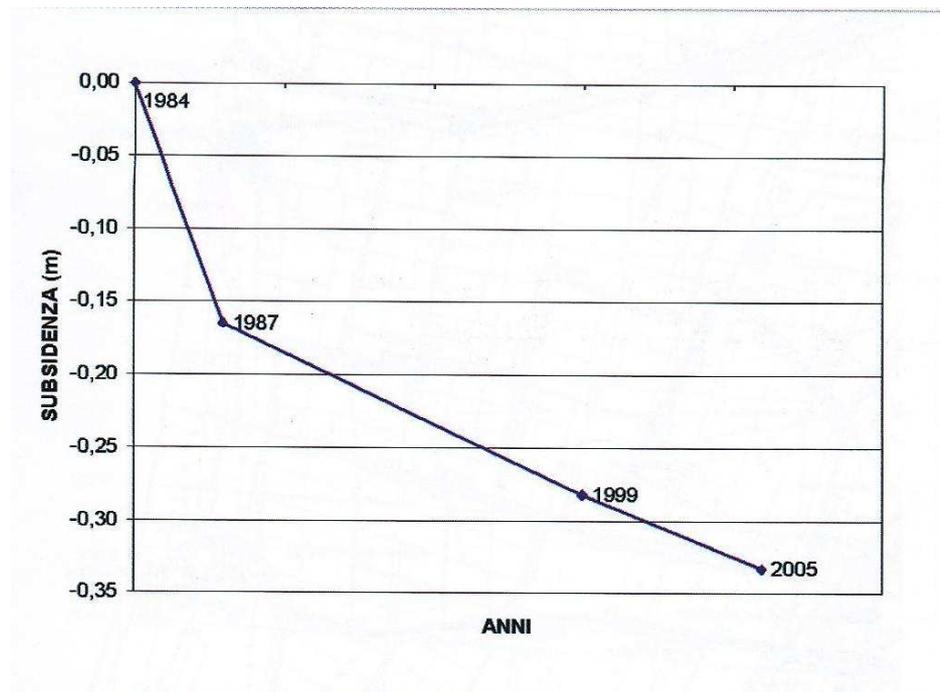


Fig. 5 Tasso di subsidenza rilevato a Cesenatico negli anni 1984-2005

Con il fenomeno dell'eustatismo si indica l'oscillazione del livello marino, positiva o negativa, verificatasi nel corso dei vari tempi geologici e dovuta a cause di varia origine (sedimentazione, evaporazione, glaciazione..) che produce una riduzione della capacità di ritenzione dei bacini marini o una variazione di volume delle acque in essi contenute.

La combinazione dei fattori sopra descritti ha portato nel corso degli anni, dei decenni, alla lenta trasformazione della linea di riva, sottoposta a continui e successivi fenomeni di erosione e deposito di materiale sabbioso.

Ai fini della salvaguardia delle spiagge, che avevano oramai acquisito un importante valore economico, si sono susseguiti nel tempo diversi interventi consistenti principalmente nella sistemazione di opere rigide di difesa e in interventi di ripascimento.

### *3.3.2 Opere rigide di difesa dall'erosione*

La difesa delle spiagge dal fenomeno dell'erosione marina in Emilia Romagna ha subito una modificazione sostanziale nei primi anni '80 a seguito dell'approvazione e della messa in pratica da parte della Regione delle indicazioni del Piano Costa 1981.

Questo studio aveva infatti posto l'esigenza di abbandonare la difesa rigida, generalmente realizzata con massi rocciosi assemblati in diverse tipologie di opere, per l'elevato impatto paesaggistico-ambientale e aveva indicato quale alternativa il ripascimento artificiale.

Per far fronte ai processi erosivi, sempre comunque presenti su gran parte del litorale, tra il 1983 e il 2006, sono stati portati a ripascimento 6,6 milioni di metri cubi di sabbia, in gran parte prelevata da cave a terra e trasportata su gomma sulla costa. La differenza degli effetti prodotti dall'applicazione dei due diversi schemi, opere rigide e ripascimento, è risultata del tutto evidente già nel corso della redazione del Piano Costa 1996.

Infatti, mentre la realizzazione di nuove scogliere determina lo spostamento continuo del punto di erosione sui litorali limitrofi, per cui il ricorso a queste opere si traduce in una reazione a catena scogliera-erosione-scogliera, con il ripascimento il punto di erosione rimane fermo, inoltre la sabbia che il mare asporta nelle zone di intervento va ad alimentare le spiagge sottoflutto.

Anche se il ripascimento richiede apporti di sabbia periodici, la differenza dei risultati è enorme, soprattutto se riferita all'impatto paesaggistico-ambientale e, conseguentemente, alla fruizione turistica dell'arenile.

Per quanto riguarda la capacità di smorzamento dell'energia del moto ondoso non vi è differenza tra l'efficacia dimostrata dalle scogliere parallele emerse e una larga spiaggia con dune al retro.

Per tutte queste ragioni il Piano Costa 1996 ha evidenziato come la sabbia sia l'elemento fondamentale su cui si deve basare la difesa del litorale regionale.

L'intreccio che negli anni si è venuto a costruire tra l'espansione a macchia d'olio dell'urbanizzazione lungo il litorale da un lato e l'estendersi dei processi erosivi sugli arenili dall'altro, ha portato alla realizzazione di decine di chilometri di opere di difesa rigide.

L'alto numero delle tipologie realizzate lascia trasparire la grande portata dei fenomeni erosivi (vedi figura 6) verificatisi a partire dal 1950 lungo questa costa bassa e sabbiosa, le difficoltà tecniche incontrate e lo sforzo di ricerca fatto nel tentativo di contenere il mare e nel contempo di mantenere la spiaggia, vista anche l'importanza che nel frattempo ha assunto.



Fig. 6 Fenomeni erosivi in atto sulla costa

Si può quindi affermare che il litorale emiliano romagnolo può essere considerato un vero e proprio laboratorio di opere di difesa dal mare. Occorre fare un breve cenno anche al ruolo fondamentale che hanno i porti nell'intercettazione del trasporto di sedimenti lungo riva, e dunque nella modifica della morfologia costiera lungo tutto il litorale considerato. La costruzione di un porto canale arresta la migrazione delle foci fluviali e inevitabilmente fa da barriera al flusso solido di materiale sabbioso proveniente dalle foci stesse che trasportato lungo riva si deposita in prossimità dei porti stessi, conferendo al litorale un andamento a dente di sega. In pratica accentua il comportamento che si ha in presenza di pennelli (fig. 7)



Fig. 7 Effetti di un porto canale sul trasporto solido

### 3.4 Vulnerabilità alla ingressione marina

Oltre all'erosione delle spiagge, il litorale dell'Emilia Romagna è sempre più esposto all'azione di un altro fenomeno che ne peggiora la stabilità e che contribuisce in maniera significativa ad aumentarne il grado di vulnerabilità: si tratta del rischio di ingressione marina durante mareggiate associate ad acqua alta. In concomitanza di bassa pressione

atmosferica, forti venti da Sud-Est e alte maree sizigiali, il livello del mare si può innalzare fino a sfiorare i 2 m.

Quando questo fenomeno è associato a mareggiate di forte intensità, si ha un ulteriore sovrizzo, ragione per cui il mare può superare la spiaggia emersa e penetrare nel territorio retrostante.

Se si considera che 80 km del litorale regionale sono urbanizzati e che gli apparati dunosi sono stati quasi del tutto smantellati per far posto a strutture alberghiere o a stabilimenti balneari, si capisce quanto l'acqua alta sia divenuta nel tempo una seria minaccia oltre che fonte di ingenti danni.

Bisogna considerare che il grado di esposizione della costa emiliano romagnola all'acqua alta è aumentato moltissimo negli ultimi 50 anni a causa dell'abbassamento del terreno dovuto alla massiccia estrazione di acqua e metano dal sottosuolo. Dai dati IGM e ARPA risulta infatti che dal 1950 e il 2006 la fascia costiera si è abbassata di 70 cm a Rimini e di 1 m da Cesenatico al Delta del Po.

La bassa giacitura originaria del sistema litoraneo, la subsidenza e la presenza, nella provincia di Ferrara e Ravenna, di circa 100000 ettari di territorio giacenti a quote inferiori al medio mare, hanno determinato la necessità di effettuare i primi interventi di protezione dall'acqua alta agli inizi degli anni '50.

Nel Novembre del 1966 però, un'intensa mareggiata associata ad un rialzo record del livello del mare di 196 cm, ha segnato il passaggio ad una nuova fase.

Quell'evento eccezionale portò infatti all'allagamento da parte del mare di vastissimi territori nell'area ferrarese e ravennate. Determinò danni ingenti, ma soprattutto dimostrò che le modificazioni prodotte dall'intenso sviluppo economico degli anni '50 e dei primi anni '60 avevano reso più fragile il sistema ambientale costiero.

Per cui il fenomeno dell'ingressione marina, in assenza di interventi urgenti, si sarebbe potuto ripetere con frequenza crescente.

Dopo alcuni anni da quell'evento lo stato finanziò, accanto al ripristino e al rafforzamento delle opere danneggiate, la realizzazione di nuovi sistemi di difesa dal mare, articolati anche in diverse linee.

L'area maggiormente interessata da questi lavori fu il litorale ferrarese che aveva subito i maggiori danni. In particolare in corrispondenza dei circa 14 km di litorale da Porto Garibaldi al rilevato arginale del Po di Volano, la difesa fu articolata su ben 3 linee:

- 9 km di scogliere a mare;
- costruzione ex-novo, dove assente, di un rilevato dunale al retro della spiaggia;
- rialzo e protezione con massi del rilevato stradale denominato Argine degli Acciaioli, posto ad una distanza media di circa 1 km dalla battigia.

Il 22 dicembre 1989 un secondo evento eccezionale dimostrò nettamente che quanto fatto fino ad allora non era sufficiente e che, a causa della subsidenza molto elevata, l'area a rischio si era notevolmente estesa verso Sud, per cui era ormai in situazione critica anche la fascia costiera del Comune di Ravenna, lunga ben 37 km.

La Legge 845/80, nota come legge Speciale per Ravenna, nacque proprio per mettere al riparo questa antica città e il suo territorio dai danni causati dalla subsidenza.

Nel corso degli anni '80 e dei primi anni '90, grazie alle decine di miliardi di lire stanziati in virtù di questa legge, sono stati così rialzati molti chilometri di argini e banchine portuali, costruiti chilometri di dune artificiali, muretti di protezione e scogliere radenti. Queste opere, finalizzate esclusivamente alla difesa dalle ingressioni dirette da mare o dalle piallasse, cioè dalle lagune interne collegate al mare, sono state poi integrate su lunghi tratti di spiaggia da altri interventi di difesa dall'erosione.

Nel corso degli anni '90 il centro storico di Cesenatico è stato interessato da allagamenti sempre più frequenti, rendendo necessaria anche per questa località la progettazione di un articolato sistema di difesa.

Ovviamente, il problema della vulnerabilità alla ingressione marina è comune un po' a tutte le zone che si affacciano sul mare.

A livello europeo si ricorda soprattutto l'inondazione del 1953 del Mare del Nord (fig. 8). Una combinazione di alta marea con tempesta di vento ha portato al sovrizzo del livello marino di 5.5 metri rispetto al medio mare.

Le onde superarono le barriere e i sistemi di difesa causando estese inondazioni. Le nazioni che furono colpite dal disastro, con relative perdite di vite umane, furono principalmente i Paesi Bassi, il Regno Unito e il Belgio. In totale morirono circa 2400 persone.



Fig. 8 Inondazione del Mare del Nord, 1953. (it.Wikipedia.org)

### 3.5 Il caso di Cesenatico

Il caso particolare su cui si focalizza l'attenzione ai fini del presente studio è quello di Cesenatico. Per comprendere le dinamiche di

trasformazione della costa che colpiscono Cesenatico, occorre prendere in analisi il tratto di costa da Rimini a Cesenatico, trattandosi di una unica unità costiera. Il tratto in esame è compreso tra i moli del porto di Rimini e quelli del porto di Cesenatico, per una lunghezza di 20 km.

La caratteristica che più contraddistingue questo tratto di litorale rispetto agli altri è la presenza di una serie ininterrotta di scogliere parallele emerse da un estremo all'altro (fig. 9).

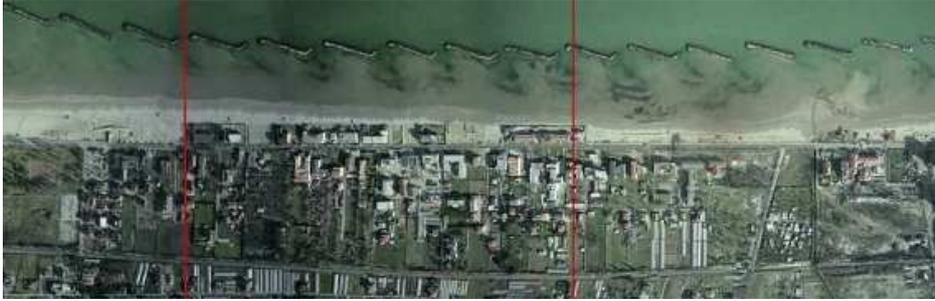


Fig. 9

La linea di scogliere costituisce una separazione molto netta non solo per lo specchio di mare antistante la costa, ma anche per quanto riguarda la natura e la morfologia del fondale. Infatti tra la battigia e le opere si sedimentano sabbie molto fini e limi, che in questa fascia non sarebbero certamente presenti se la spiaggia fosse libera.

Così il fondale si è alzato fino a meno di un metro sotto il livello del medio mare all'interno delle scogliere, mentre all'esterno è stato eroso ed ora è 3-4 m sotto il livello del mare.

Relativamente ai risultati del calcolo dei volumi, risulta che il bilancio della spiaggia emersa è positivo per circa 300000 metri cubi, mentre tra battigia e scogliere, nei sei anni che separano le campagne di analisi del 2000 e 2006, si è accumulato un milione di metri cubi di materiale.

A fronte di un volume di sabbia pari a circa 430000 metri cubi portato a ripascimento tra il 2000 e il 2006, nei 4-5 tratti in cui la spiaggia è in arretramento è ragionevole ipotizzare un'alimentazione naturale di 870000 metri cubi, senza considerare il quantitativo che è andato a compensare la subsidenza stimabile in circa 200000 metri cubi.

I tre fiumi che sfociano nel tratto costiero in esame, e cioè Marecchia, Uso e Rubicone, avrebbero quindi contribuito in maniera significativa coi loro apporti sedimentari al conseguimento del bilancio sopradescritto.

Il contributo del Marecchia è del tutto evidente da 15-20 anni ed interessa più di 3 km di litorale a Nord della foce, sia all'interno che all'esterno delle scogliere.

La linea di riva infatti è in avanzamento fino a Viserbella. Modestissimo invece quello dei fiumi Uso e Rubicone, tanto che le spiagge ai lati del Rubicone sono state oggetto di vari ripascimenti (fig. 10).



Fig. 10 Spiaggia prima e dopo un ripascimento

Tra Rimini e Cesenatico la spiaggia è in erosione nei 3 km che vanno da Torre Pedrera ad Igea Marina Sud, nei litorali ai lati della foce del Rubicone (S.Mauro, Savignano e Gatteo) e nel tratto di Valverde di Cesenatico.

In quest'ultimo tratto è stato realizzato nel periodo 2000-2006 un importante lavoro di modifica e ristrutturazione delle opere rigide presenti, accompagnato da un ripascimento di 160000 metri cubi.

Esternamente alle scogliere le mappe di accumulo ed erosione mostrano come la fascia più esterna, prossima alla batimetrica dei 7 m, sia stata sottoposta a processi erosivi che hanno determinato l'abbassamento del fondale di 10-30 cm.

Il materiale eroso lungo tutta questa fascia longitudinale sarebbe stato spinto verso costa.

All'origine di questo fenomeno si crede ci possa essere la mareggiata di grande intensità del settembre 2004 che ha raggiunto altezze d'onda massime di 5,45 m alla boa di Ancona.

In sintesi l'evoluzione di questo tratto nei 6 anni considerati evidenzia un bilancio leggermente positivo, pur con la modificazione appena descritta, nella ampia fascia esterna alle scogliere.

Nella fascia di spiaggia emersa e sommersa interna alle opere, l'aspetto che maggiormente colpisce è il bilancio positivo per oltre 800000 metri cubi di materiale.

Va detto però che, a causa anche della subsidenza e nonostante la presenza di una serie ininterrotta di scogliere su tutto il tratto, persistono alcune zone in cui la spiaggia arretra. Il loro equilibrio è stato garantito con il ripascimento periodico che, nei sei anni considerati, è consistito nell'apporto di 430000 metri cubi di sabbie. Tali interventi di ripascimento dovranno essere effettuati anche in futuro, per garantire il mantenimento dell'equilibrio.

A Cesenatico (fig. 11) la scogliera semisommersa presente è stata realizzata nel 2002 dal Genio Civile OO.MM di Ravenna a protezione dei primi 800 m di spiaggia a Nord dei moli del porto. Questo tratto costiero è in forte erosione dai primi anni '70 ed è stato protetto nel 1978 con Tubi Longard e nel 1983 con il ripascimento e barriere sommerse in sacchi per il contenimento della sabbia.



Fig. 11 Barriere semisommerse e porto canale a Cesenatico

Sempre negli anni '70 sono stati costruiti, 700 m a Nord del molo portuale, 3 piccoli pennelli in massi. A terra, sull'estremità Nord della zona protetta è presente un massiccio pennello in massi che si spinge in mare per 70 m. La barriera è continua, ha un solo tratto ribassato a ridosso del molo portuale ed è distante circa 250 m dalla battigia, mentre la larghezza della berma è di 12 m. L'intervento è stato completato con il versamento di circa 150000 metri cubi di sabbia.

L'abitato di Cesenatico e il territorio retrostante sono stati interessati per tutti gli anni '80 dalla velocità di abbassamento del suolo più elevata dell'intera fascia costiera regionale: 4-5 cm all'anno.

Tra il 1950 e il 2006 è stato riscontrato un abbassamento complessivo di 110-120 cm all'anno e come causa principale è stato individuato l'emungimento di acqua dal sottosuolo.

Come affermato sopra, le principali ricadute di questo fenomeno sono state: i forti processi erosivi delle spiagge a Nord e a Sud del portocanale e l'allagamento di parti sempre più estese del centro abitato durante mareggiate con acqua alta (figura 12).



Fig. 12 Caso di acqua alta a Cesenatico

L'allagamento è avvenuto sia per esondazione del portocanale sia per ingressione diretta attraverso la spiaggia.

I forti danni prodotti da ogni evento e la crescente frequenza degli stessi hanno spinto l'amministrazione comunale a sottoporre la gravità della situazione allo Stato e alla Regione. Nella seconda metà degli anni '90 lo Stato ha finanziato così tre progetti aventi come scopo principale la difesa dall'erosione di tre zone distinte del litorale comunale, con evidenti ricadute anche sulla limitazione del pericolo di ingressione marina.

I tre interventi hanno riguardato:

- Cesenatico centro: completamento della difesa a mare del tratto costiero immediatamente a Sud del molo, con scogliere parallele emerse e atolli emersi in massi rocciosi (1997);
- Cesenatico ponente: costruzione di una barriera semisommersa lunga 800 m subito a Nord del portocanale, ripascimento con 160000 metri cubi di sabbia e salpamento di un pennello presente 400 m a Nord dello stesso molo (2003-2005);
- Valverde: modifica dell'assetto di tre scogliere parallele emerse, salpamento di 16 pennelli, costruzione di tre nuovi pennelli e apporto di circa 160000 metri cubi di sabbia (2003-2005).

Visto che gli allagamenti da parte delle acque marine sono stati determinati, nella maggior parte dei casi, da esondazioni del portocanale, all'altezza del fabbricato del faro è stato costruito uno sbarramento mobile, tipo porte vinciane, il cui compito è quello di impedire la risalita dell'acqua di mare verso terra durante fenomeni di acqua alta superiori ai 90 cm.

L'opera, molto complessa nel suo insieme, ha richiesto la deviazione del portocanale per più di un anno e la costruzione di un fabbricato a lato per l'alloggiamento di motori e pompe da attivare nel caso in cui l'intervento di acqua alta sia associato a forti piogge. I lavori sono stati completati nel 2005.

Il portocanale funziona infatti come arteria di scolo della città e di un vasto territorio retrostante; con le paratie chiuse per il contenimento dell'acqua alta, Cesenatico rischierebbe quindi di essere allagata da terra dalle acque di pioggia. Per ridurre il rischio il progetto ha previsto la costruzione di un piccolo impianto idrovoro a lato delle porte vinciane.

Nel caso di pioggia eccezionale solo una piccola quantità delle acque meteoriche potrà però essere pompata in mare attraverso il portocanale. Per far fronte a questi eventi, è stata prevista la costruzione di due casse di espansione a monte della città, in grado di diminuire la portata massima in caso di eventi con tempi di ritorno di 100 e 200 anni. Per garantire lo scarico a mare della portata rimanente, circa 90 metri cubi all'ora, è stato previsto l'allargamento dagli attuali 5-6 m a 15 m del canale Tagliata che sfocia a mare 2 km a Nord del portocanale. Parallelamente a questi interventi, il Comune, per mettere in sicurezza l'abitato dalle ingressioni attraverso la spiaggia, ha realizzato un rilevato in terra lungo circa 1,4 km, nel primo tratto a Sud del portocanale al retro degli stabilimenti balneari. Questa struttura, larga una ventina di metri e alta circa un metro, è stata inserita nel retro spiaggia in modo da ottenere un profilo architettonico molto gradevole e arredata con giochi, fioriere, alberi e strutture varie.

L'insieme di queste opere, rese necessarie dalla forte subsidenza, ha comportato una spesa rilevante, stimabile in oltre 30 milioni di euro. A

tale importo vanno aggiunti i danni, il costo di altre opere già realizzate in precedenza, quali il rialzo delle banchine portuali, del sistema fognario e quello degli interventi di difesa dall'erosione realizzati nel corso degli anni '80 e nei primi anni '90. A questa cifra vanno aggiunti gli importi di interventi che devono ancora essere realizzati.

Accanto ai costi monetizzabili ve ne sono però tanti altri riguardanti ad esempio gli impatti paesaggistici-ambientali e i disagi subiti dalla popolazione e dalle attività produttive di difficile quantificazione.



# CAPITOLO 4

## La modellazione matematica

Alla luce di quanto detto fino ad ora, risultano evidenti le diverse problematiche che investono il litorale emiliano romagnolo e, nel caso specifico, le problematiche che coinvolgono la città di Cesenatico.

Gli scenari combinati di alti livelli idrici in condizioni di storm-surge, subsidenza ed eustatismo, erosione costiera, fanno sì che Cesenatico si trovi ora ad essere soggetta a più o meno frequenti casi di inondazione. Le misure preventive di difesa sono ad oggi poche e in alcuni casi poco efficaci.

Ciò porta alla necessità di cercare di prevedere quali possano essere le conseguenze delle inondazioni in modo da mettere in atto una strategia decisionale e pianificativa che miri alla salvaguardia della popolazione, del centro abitato e dei punti di interesse. Il metodo che più si presta al processo di previsione è sicuramente quello dell'applicazione di un modello matematico, che simuli i vari scenari di rischio e fornisca quindi l'idea di una potenziale situazione di emergenza.

Come noto, il supporto di un modello matematico richiede comunque un atteggiamento critico verso i risultati da esso restituiti in modo da essere in grado di verificare la veridicità degli stessi e apportare eventuali modifiche ai dati di input nel caso in cui si riscontrino output poco veritieri. Ciò richiede necessariamente la conoscenza delle equazioni che regolano il modello e delle condizioni al contorno che sostanzialmente definiscono il campo applicativo dello stesso.

Di seguito si descrive più nel dettaglio il procedimento seguito nell'ambito di questa tesi e il programma di modellazione scelto.

Per ogni fase di realizzazione della simulazione si è optato per l'utilizzo dei modelli che si sono ritenuti più adatti allo scopo.

La scelta effettuata in questo caso specifico è stata quella di realizzare una procedura ad hoc Matlab per il trasferimento delle onde da largo a riva, per il calcolo del wave set-up e del wave run-up. La probabilità di allagamento è stata valutata mediante un modello 1DH basato su un profilo perpendicolare alla costa tenendo conto della distribuzione statistica delle variabili idrauliche (onda, marea) e geometriche (caratteristiche del profilo); per tale analisi si è scelto il codice STRUREL.

Infine, la valutazione della dinamica di inondazione da mare è stata effettuata mediante un modello 2D basato sulla creazione di un DTM ad elevata risoluzione; per questa analisi si è scelto il codice MIKE 21 HD FM.

In entrambe le modellazioni matematiche si considera il fondale non erodibile, e dunque non si rappresenta il rimodellamento della spiaggia durante l'evento di mareggiata anche perché la situazione iniziale del profilo è strettamente dipendente dalle condizioni climatiche antecedenti l'evento. Inoltre si lavora nell'ipotesi che non si formino brecce nelle opere e nell'argine a mare o nelle dune durante l'allagamento; nella modellazione 1DH si stima la probabilità di allagamento nelle due condizioni estreme di profilo, con e senza le dune.

#### **4.1 Il modello numerico Mike 21**

MIKE 21 è un pacchetto software ingegneristico professionale di simulazione per le correnti a pelo libero con schema bidimensionale, sviluppato dal DHI ovvero Danish Hydraulic Institute, applicabile in ambiente fluviale e marino indistintamente. MIKE 21 è utilizzabile per la simulazione bidimensionale di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi, estuari, baie, aree costiere e mari comprendenti trasporto solido, qualità delle acque, propagazione delle onde, eutrofizzazione, spargimenti di olio, trasporto di sedimenti coesivi ed altro.

Il sistema Mike 21 è costituito di quattro gruppi principali di modelli numerici: idrodinamico, processo sedimentario, onda e modelli idrodinamici ambientali.

Nel nostro caso si utilizza il modulo HD, cioè idrodinamico.

La modellazione bidimensionale si propone di quantificare le zone maggiormente vulnerabili, la rapidità e la intensità della inondazione negli scenari selezionati.

La scelta del modulo MIKE 21 HD FM è dovuta al fatto che esso serve a simulare i livelli idrici e i flussi determinati dai gradienti di radiation stress, dal vento, dalla marea o da portate fluviali. I risultati forniti sono rappresentati dalle variazioni spazio-temporali dei livelli idrici e dei campi di velocità.

Il modulo HD ("Hydrodynamic Module") è il modello centrale del sistema MIKE 21 e serve come base per la maggior parte degli altri modelli di MIKE. Ad esempio fornisce i fondamenti per lo studio del trasporto solido. Il modello MIKE 21 HD è abbastanza versatile da riuscire a rappresentare una varietà di diversi sistemi come laghi, oceani, fiumi ed estuari. Per farlo il modello simula le fluttuazioni del livello idrico e dei flussi risultanti da una varietà di forzanti. I livelli idrici e i flussi sono determinati tramite la risoluzione delle equazioni di continuità e della quantità di moto su una griglia rettangolare alle differenze finite usando uno schema implicito di accuratezza del secondo ordine. MIKE 21 HD viene calibrato usando tre parametri: la resistenza al fondo, il fattore d'attrito del vento e il coefficiente di dispersione della quantità di moto. La accuratezza del modello è determinata più dalla qualità dei dati di setup che dalle variazioni nella calibrazione dei coefficienti. Il setup richiede la batimetria, le condizioni al contorno (livello idrico o dati di flusso), condizioni iniziali, dati meteorologici, e valori iniziali per la calibrazione dei coefficienti.

Il modulo FM ("Flexible Mesh") è di grande utilità perché permette di rappresentare una mesh di dimensioni diverse in funzione del grado di dettaglio che si vuole ottenere in ogni zona. Dunque, elementi più

piccoli per grandi livelli di dettaglio ed elementi più grandi per minori livelli di dettaglio.

A livello analitico, il MIKE 21 risolve le equazioni di Reynolds RANS (ossia Reynolds Averaged Navier Stokes) integrandole lungo la profondità del battente d'acqua. Ecco perché il modello è bidimensionale. Infatti le equazioni RANS, che consistono nell'equazione di continuità e di conservazione della quantità di moto, vengono risolte lungo le due dimensioni orizzontali usando dei metodi impliciti alle differenze finite.

Risulta di un certo interesse notare che attraverso il MIKE 21 è possibile includere in queste equazioni gli effetti di fenomeni importanti quali: la dispersione della quantità di moto, i flussi supercritici, la presenza delle opere idrauliche, la presenza di sforzi di taglio dovuti al vento e, volendo, anche l'evaporazione delle superfici liquide.

Una generica simulazione si articola su diversi passi. In primo luogo si consideri che il programma genera una griglia (mesh) a maglie rettangolari o triangolari che costituiscono gli elementi finiti nei quali viene suddivisa tutta l'area oggetto della simulazione numerica.

Inoltre, il programma lavora sulla base di dati di input necessari alla ricostruzione della batimetria da investigare. Tale batimetria di input è ricostruita servendosi di un dettagliato rilievo LIDAR della zona su cui si effettua l'analisi. E' compito del modellista prestare particolare attenzione all'interpretazione di questi dati al fine di acquisire un maggior livello di dettaglio. Infatti, la risoluzione di un rilievo LIDAR è molto elevata ma non è in grado di distinguere ad esempio una strada da un albero: ciò significa che senza un'opportuna interpretazione e conseguente correzione apportata dal modellista, ad esempio l'albero potrebbe essere considerato dal programma come locale aumento dell'altezza di fondo della batimetria invece che un locale cambiamento della scabrezza.

Una volta inseriti i dati è possibile inserire i valori delle scabrezze punto per punto e le condizioni idrodinamiche al contorno.

A questo punto, una volta inseriti tutti i dati necessari alla riproduzione ottimale della topografia del luogo, viene generata la mesh. Le dimensioni delle maglie della mesh, si ripete, vengono decise dall'utente in funzione del livello di dettaglio che si vuole ottenere.

Dopo aver generato la griglia è importante smussarla e affinarla cercando di uniformare le dimensioni delle maglie ed evitare che si creino degli elementi finiti di dimensioni troppo ridotte, che potrebbero rallentare la simulazione o impedirne il corretto svolgimento.

Quando la griglia è pronta si procede con l'interpolazione; durante questa fase, completamente gestita dal processore, MIKE 21 interpola tutti i punti che sono stati inseriti nella griglia andando a restituire una maglia dove, ad ogni singolo elemento finito, è stata conferita una quota. E' ovvio pensare che la quota del singolo triangolo o quadrato della maglia deriva proprio dall'interpolazione dei punti interni, o comunque più vicini, all'elemento considerato. Ovviamente, più sono piccoli questi elementi, maggiori saranno le difficoltà che incontra il software nell'interpolazione e nella generazione della nuova griglia interpolata. Ora, se il lavoro è stato eseguito con una certa precisione e i dati a disposizione sono sufficienti e ben distribuiti, la nuova maglia generata

dovrebbe rappresentare abbastanza bene la morfologia del territorio su cui effettuare la simulazione.

Dunque, il risultato dell'interpolazione dovrebbe consistere in una batimetria abbastanza simile a quella reale. Chiaramente, dove vi è una grossa carenza di dati, ossia di punti, ovvero dove questi sono meno frequenti, l'interpolazione generata può essere confusa o non affidabile, riproducendo dei tratti batimetrici che, molto probabilmente, non esistono o sono molto diversi dalla realtà.

Quindi, allo scopo di migliorare l'efficacia dell'interpolazione e ottenere una mesh che approssimi bene la batimetria reale si è soliti suddividere l'area di interesse, già durante la fase di preparazione della griglia, in diversi poligoni di dimensioni e forme variabili. Tali poligoni vengono tracciati dall'utente e racchiudono le opere idrauliche (come i moli, i pennelli e le barriere), i diversi settori della spiaggia e quelli del fondale. Il vantaggio di suddividere l'area di interesse in diversi poligoni risiede nella possibilità di generare la maglia anche all'interno del poligono stesso; inoltre per ogni poligono è possibile utilizzare una risoluzione spaziale diversa con il risultato che all'interno della griglia contenente tutta la zona da simulare, verranno generate delle maglie di differenti dimensioni.

Allo stesso modo si può decidere di escludere un poligono dalla mesh (ad esempio un pennello): ciò significa considerare tutto ciò che vi è contenuto all'interno come completamente riflettente, ovvero che tale area non verrà interessata dall'acqua durante la simulazione. Quindi verranno inclusi nella mesh tutti quei poligoni che racchiudono al loro interno entità che si pensa possano essere coinvolte nei processi idrodinamici e morfodinamici. Tra queste ricordiamo ad esempio le spiagge, i fondali, le strutture idrauliche che vengono costantemente tracimate dall'azione ondosa (come le opere sommerse) e quelle che vengono coinvolte nei fenomeni di filtrazione (come le barriere emerse). Mentre i poligoni che vengono esclusi dalla mesh sono quelli che racchiudono ad esempio i moli portuali. Infatti queste sono opere che solitamente sono costruite con materiali che impediscono la filtrazione e la trasmissione dell'acqua. Inoltre, le quote che competono a queste strutture sono tali da renderle esenti dai fenomeni di tracimazione dell'onda. Escludendo queste strutture dalla mesh è come considerarle, dunque, totalmente riflettenti. Di conseguenza per queste opere non è necessario inserire alcun valore di scabrezza.

Successivamente all'interpolazione, una fase importante è quella dell'inserimento dei valori delle scabrezze. E' necessario che il modellista abbia una certa esperienza che gli consenta di inserire valori di scabrezza affidabili, relativamente ai diversi elementi che si considerano.

Una volta che il software ha generato la batimetria, si può procedere dunque con l'inserimento dei dati del clima meteo-marino. In particolare, gli scenari ondosi scelti dall'utente devono essere caratterizzati da un'altezza d'onda, da una direzione di provenienza prevalente, dal periodo e dal corrispondente livello di marea. Di solito il valore del periodo è considerato costante.

Il primo passo della simulazione consiste nel considerare i processi di trasferimento delle onde da largo a riva; infatti, di solito, si dispone di

dati relativi alle acque profonde e quindi riguardanti zone del mare poste ad elevate distanze dalla costa dove si suppone che le condizioni ondose siano molto diverse da quelle generate vicino alla riva.

Invece con il trasferimento è possibile ottenere le nuove onde che si creano sottocosta e che caratterizzano le acque basse, con il risultato di una migliore rappresentazione delle reali condizioni ondose che si verificano vicino alla spiaggia. Naturalmente le caratteristiche delle onde trasferite saranno abbastanza diverse da quelle relative alle onde in acque profonde. Questo avviene a causa dei fenomeni incontrati dalle onde durante il loro percorso verso riva (ad esempio rifrazione e shoaling) che conferiscono alle onde stesse direzioni diverse da quelle di partenza e altezze d'onda leggermente differenti. Per quest'ultima problematica si rimanda al paragrafo successivo.

Infine, è anche possibile effettuare una simulazione morfodinamica che simuli gli effetti del trasporto solido generato in seguito alla presenza di una determinata onda e della relativa corrente.

#### 4.2 Problematiche della modellazione numerica bidimensionale

Come precedentemente anticipato, uno dei problemi da risolvere nella modellazione bidimensionale è come trasferire le onde da largo a riva, assieme al calcolo del wave set-up e del wave run-up.

In questo contesto il trasferimento delle onde da largo a riva avviene secondo la metodologia classica indicata da Goda (1985):

$$H_s = \begin{cases} K_s H_{s0} & d / L_{s0} \geq 0.2 \\ \min[(\beta_0 H_{s0} + \beta_1 d); \beta_{\max} H_{s0}; K_s H_{s0}] & d / L_{s0} < 0.2 \end{cases}$$

dove:

$$\beta_0 = 0.028 (H_{s0} / L_{s0})^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \vartheta),$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \vartheta),$$

$$\beta_{\max} = \max[0.92; 0.32 (H_{s0} / L_{s0})^{-0.29} e^{(2.4 \tan \vartheta)}]$$

$\theta$  = inclinazione del fondale marino

$d$  = profondità locale

$K_s$  = coefficiente di shoaling

Il wave set-up (Burcharth et al., 2007) è calcolato tramite la eq. :

$$\eta - \eta_b = U_\eta \frac{\frac{3}{8} \gamma^2}{1 + \frac{3}{8} \gamma^2} (h_b - h)$$

dove:

$\eta$  = set up

$U_\eta$  = incertezza sul modello di set up.

$\eta_b$  = set up al frangimento

$h$  = profondità

$h_b$  = profondità al frangimento

e l'indice di frangimento  $\gamma$  è dato, nel caso di frangimento causato dal limitato fondale (Kamphuis, 1991):

$$\gamma = \frac{H_{sb}}{h_b} = 0.56e^{3.5m}$$

con:

$m$  = pendenza del fondo al largo.

Dato che l'incertezza correlata al wave set-up è ridotta e legata al percorso effettivamente compiuto dalle onde, che provengono da più direzioni contemporaneamente con una distribuzione non nota, si assume un'incertezza di modello di tipo Gaussiano.

Un'onda risale lungo una struttura inclinata perché ha una quantità di moto non nulla che viene deviata verso l'alto: tutta l'energia cinetica che non è persa nel processo di risalita viene trasformata in energia potenziale. La risalita dell'onda, o run-up, dipende quindi in modo sostanziale dalla pendenza della struttura stessa ed in misura secondaria dalla porosità e dall'attrito che l'acqua incontra lungo la sua corsa.

La pendenza della struttura di interesse è quella incontrata durante il moto. In caso di pendenza variabile, tipicamente crescente, va verificata la risalita lungo tutto il percorso dell'onda: è infatti possibile che l'onda non superi il primo tratto poco pendente prima di trovare il tratto a pendenza maggiore.

Non esiste un metodo per il calcolo della risalita su una pendenza (molto) variabile. La seguente procedura per il calcolo del run-up è pertanto solo indicativa, dettata da meri ragionamenti di bilancio energetico:

- il profilo della costa su cui va valutato il run-up viene schematizzato in tratti a pendenza uniforme;
- si valuta la risalita dell'onda incidente di altezza  $H_i$  lungo la prima pendenza: se la cresta del primo tratto viene superata, si calcola quale onda  $H_{lim}$  avrebbe raggiunto esattamente la cresta del primo tratto e si procede al passo successivo.
- si sottrae, dall'energia incidente, l'energia relativa all'onda  $H_{lim}$  e si determina un'onda equivalente che funge da onda incidente sul tratto successivo,  $H_{eq} = \sqrt{(H_{i2} - H_{lim2})}$ .
- si calcola il run-up applicando tale onda equivalente  $H_{eq}$  (onda di altezza ridotta) al secondo tratto.

Nel calcolo da svolgere è essenziale considerare la natura irregolare delle onde. Il run-up  $R$  su ogni tratto non può essere univoco perché durante la mareggiata estrema si susseguono varie onde.

Una espressione idonea al calcolo del run-up significativo  $R_s$  è (Burcharth et al., 2007):

$$R_s/H_s = 1.35 \cdot \xi_p, \text{ se } \xi_p \leq 2; \quad R_s/H_s = 3.00 - 0.15 \cdot \xi_p, \text{ se } \xi_p \geq 2$$

dove  $\xi_p$  è l'indice di Iribarren.

Poiché la funzione è continua, essa può essere utilizzata per l'analisi di rischio.

Per onde che seguono la distribuzione di Rayleigh, vale la seguente:

$$R_{\max,p}/R_s = (0.5 \cdot (\ln N - \ln(-\ln p)))^{0.5}$$

dove  $N$  è il numero di onde.

A titolo di esempio si veda che per serie di sole 100 onde ( $N$  è dato dalla durata della mareggiata diviso per il periodo medio delle onde  $T_m$ , assumendo la seguente relazione tra periodo medio e periodo di picco:  $T_m=T_p/1.1$  circa) il più probabile massimo risulta  $R_{\max,37\%}=1.52 R_s$  e quella estrema  $R_{\max,99\%}=2.15 R_s$ .

### 4.3 Predisposizione dei dati e settaggio del modello

La necessità primaria per poter effettuare la simulazione è la messa a punto di un dtm con risoluzione sufficiente a descrivere i processi nell'area di interesse.

Per Cesenatico, la zona scelta per la simulazione si estende circa per 4.8 km in direzione parallela a costa e 1.9 km in direzione perpendicolare alla linea di costa. L'area comprende, a partire dalla linea di riva, la spiaggia emersa, due zone urbane a Nord e Sud del porto canale, il porto canale e la darsena, campi coltivati e strade. La griglia di calcolo (Fig. 10 e particolari in Fig. 11), data la complessità della zona, ha richiesto un lavoro molto oneroso consistente nei seguenti passaggi :

- l'utilizzo di foto georeferenziate per contornare edifici ed isolati da escludere dalla linea di calcolo, dato che certamente non possono essere ricoperti dalla inondazione; questo passaggio consente di eliminare le eventuali incertezze dei dati Lidar relativi agli edifici e permette di ridurre la zona da sottoporre a simulazione a vantaggio di un passo spaziale di calcolo più denso;
- l'utilizzo di foto georeferenziate per contornare la linea di riva (contorno largo al quale estendere la modellazione, come spiegato più avanti);
- l'utilizzo di un dtm ad alta risoluzione (2m) sulla base del quale costruire le linee di contorno e conseguentemente i poligoni di calcolo all'interno dei quali predisporre maglie a griglia spaziale più fitta;
- l'utilizzo di un dtm a minore risoluzione (10 m) sulla base del quale definire l'estensione massima dei dati disponibili e quindi la massima estensione della griglia di calcolo;
- la definizione di nuovi poligoni a diversa maglia, a risoluzione decrescente dalle zone di maggiore interesse (spiaggia, zone urbane, strade, fiume e argini) a quelle di minore interesse (campi coltivati, aree non edificate, zone boschive); l'affinamento della griglia di calcolo su processo iterativo, cercando di evidenziare con maglia a diversa risoluzione le zone di diverso interesse e giungendo a un compromesso sul raffittimento della stessa così da rendere ragionevoli i tempi di calcolo. Nel caso della griglia in esame in Fig. 1, il numero di elementi

della griglia è pari a 52'000 (mentre il numero di nodi supera 89'000) con tempi di calcolo dell'ordine delle 50 ore;

- l'interpolazione mediante triangolazione del dtm sulla griglia così predisposta, con ottenimento della batimetria finale previa verifica ed eventuale aggiustamento manuale delle quote dei diversi nodi di calcolo. La Fig. 2 mostra l'intera mappa di quote utilizzata per il calcolo, con dettagli sulla risoluzione in Fig. 3; Fig. 4 presenta un rendering 3D della zona di maggiore interesse.

Il dtm utilizzato fa riferimento ai dati forniti dalla Regione Emilia Romagna ed elaborati da Gecosistema.

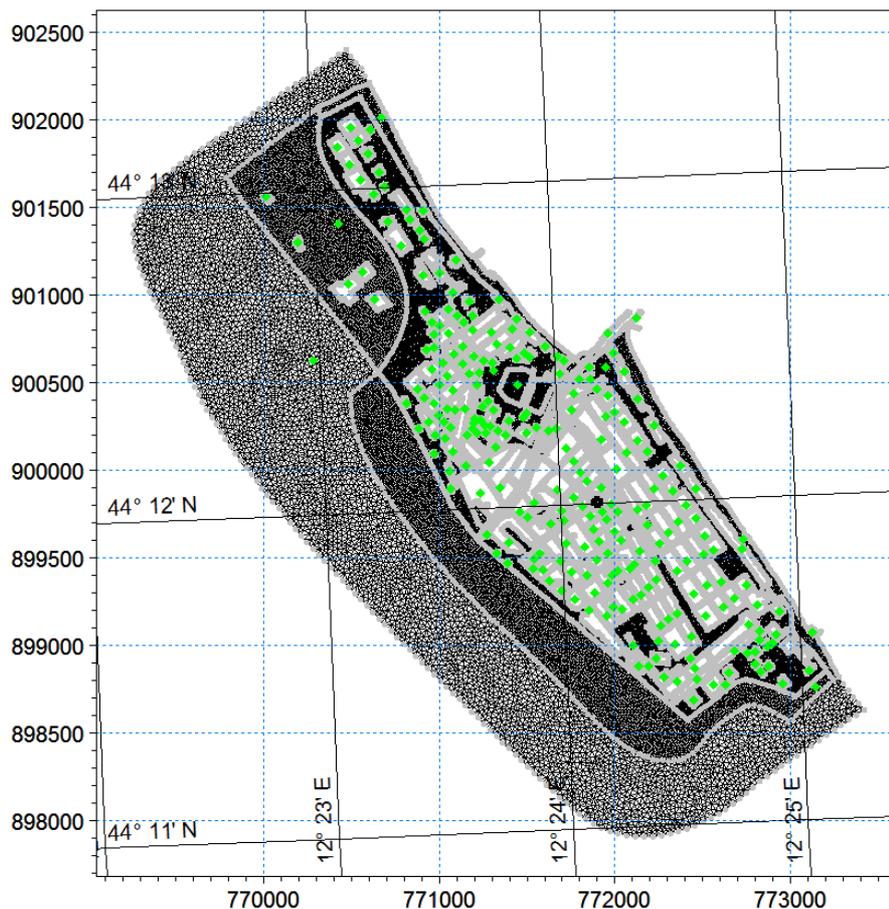


Fig. 1 Griglia di calcolo predisposta per la simulazione con MIKE 21 FM.



Fig. 2 Particolare della griglia di calcolo predisposta per la simulazione con MIKE 21 FM.

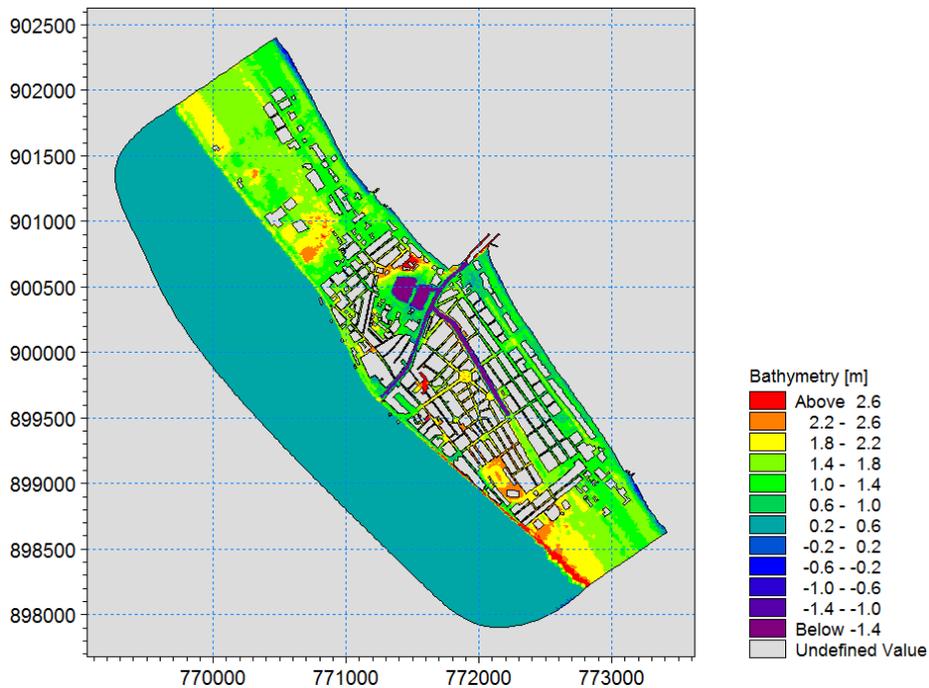


Fig. 3 Mappa delle quote adottate nella simulazione con MIKE 21 FM. Le zone bianche nella mappa corrispondono a edifici ed isolati che sono stati esclusi dal calcolo in quanto non superati certamente dal livello della inondazione.

Una volta ottenuta la griglia definitiva, si può utilizzare la medesima anche per interpolare le condizioni di scabrezze, variabili nella zona di interesse in dipendenza dall'uso e mappabili mediante riferimento alle mappe di uso del suolo ed alle ortofoto. La mappatura dei valori di scabrezza (Fig. 5) è stata fatta da Gecosistema previo accordo sui valori di Gauckler Strickler da utilizzare nelle diverse aree:  $40 \text{ m}^{1/3}$  per spiaggia emersa, zona urbana e strade;  $30 \text{ m}^{1/3}$  per alveo vegetato e argini fluviali;  $20 \text{ m}^{1/3}$  per strade e campi coltivati e zone boschive.

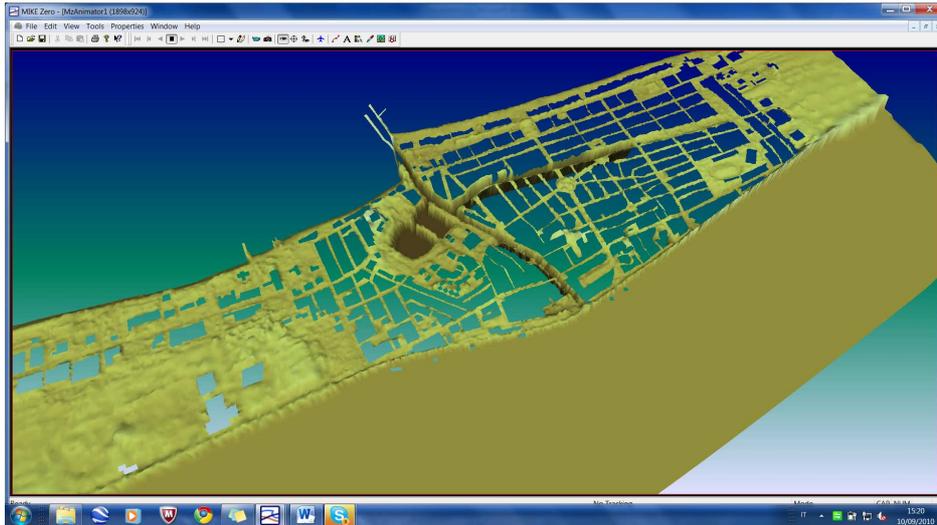


Fig. 4 Rendering 3D della area sottoposta a simulazione.

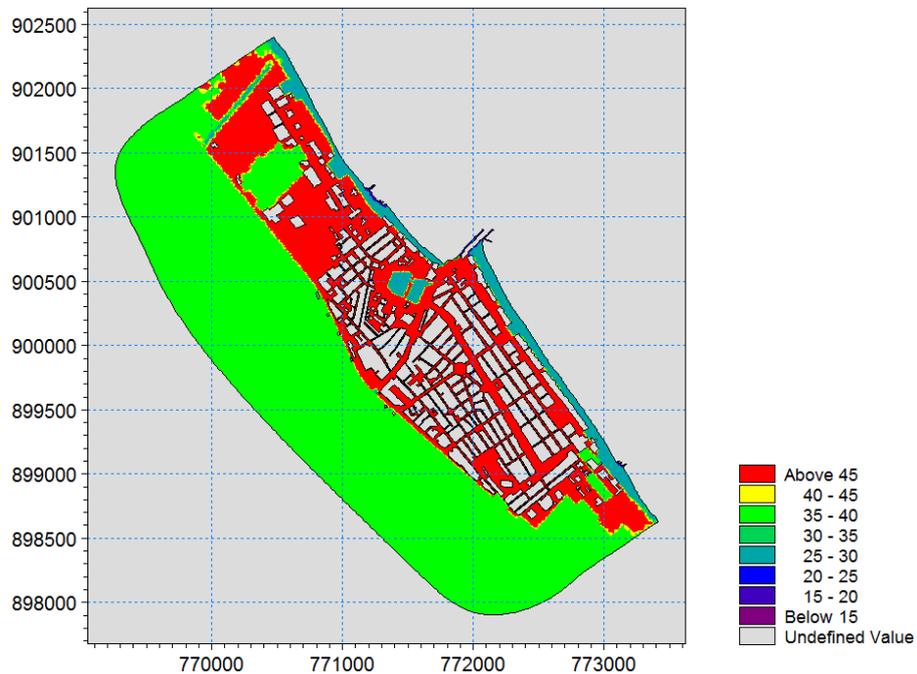


Fig. 5 Mappa delle scabrezze di Gauckler Strickler  $m^{1/3}/s$ .

La simulazione della inondazione è stata effettuata mediante il modulo HD, scegliendo

- l'algoritmo "low-order time and space integration scheme" (Fig. 6) al fine di minimizzare i tempi di calcolo mantenendo una discreta accuratezza della soluzione compatibilmente con la incertezza dei processi in esame;

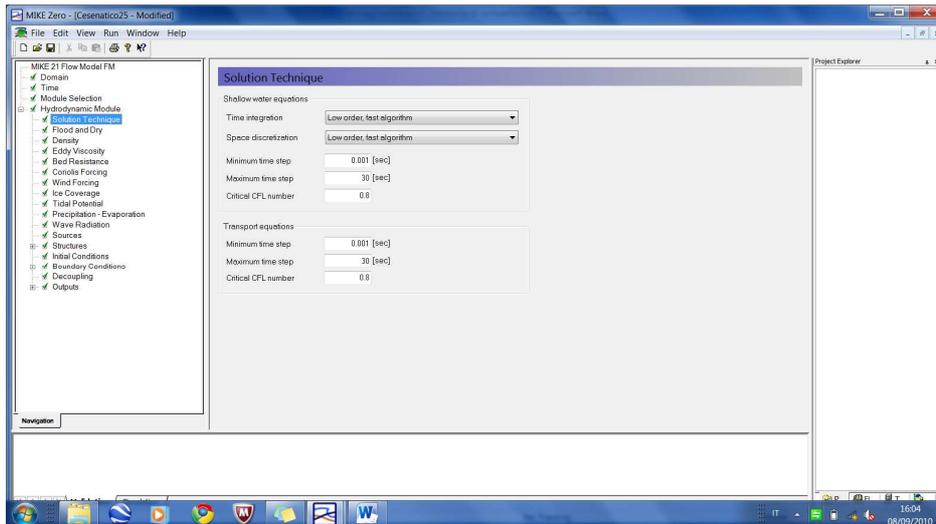


Fig. 6 Impostazione della tecnica di risoluzione “Low-order time and space integration scheme”.

- resistenza di Gauckler Strickler variabile su tutto il dominio, secondo la Fig. 5;
- rappresentazione della viscosità turbolenta mediante la formulazione di Smagorinsky a coefficiente costante pari al valore assegnato di *default* (Fig. 7).

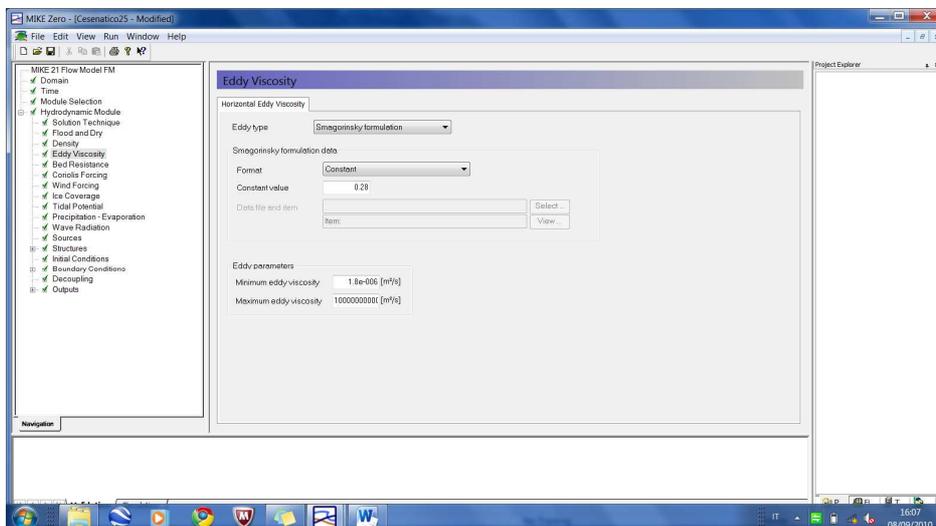


Fig. 7 Impostazione della viscosità secondo la formulazione di Smagorinsky.

L'elemento critico di questa modellazione è la definizione delle condizioni al contorno da imporre al modulo HD. Distinguiamo innanzi tutto tra il contorno lato mare e i restanti contorni, sia laterali sia lato terra.

Per i contorni laterali e lato terra si adotta la condizione di contorni chiusi, avendo cura di ampliare adeguatamente l'area di simulazione al fine di evitare di influenzare il dominio di calcolo con riflessioni spurie dell'acqua fluente contro pareti immaginarie. Il contorno lato terra è

posto sufficientemente all'interno da poter ragionevolmente considerare che l'onda di allagamento non arriverà a propagarsi fino a una tale distanza da riva. Per quanto riguarda i contorni laterali, la batimetria è stata estesa, replicando esattamente il profilo relativo all'ultimo transetto per 0.5 km sia a Nord sia a Sud dell'area di interesse.

Il contorno lato mare è stato suddiviso in parti, complessivamente cinque. Come ulteriore precauzione, si sono infatti definite due porzioni (di 500 m ciascuna) a Nord e a Sud, direttamente collegate ai profili laterali rappresentano anch'esse un contorno chiuso al fine di ridurre la zona di ingresso del mare e produrre zone d'ombra ove si possa eventualmente ridurre l'effetto di una riflessione dai contorni laterali.

Le restanti tre parti del contorno lato mare tengono conto, da Nord a Sud, del tratto di spiaggia non protetta (libera), della presenza della barriera sommersa e della barriera emersa. Lungo la linea di riva si impongono la serie temporale del livello del mare, che includendo il set-up indotto include la riduzione dell'onda a tergo della barriera (ove presente) in dipendenza dalla quota relativa della cresta della medesima, e la velocità nulla. Le condizioni imposte lato riva per le tre diverse configurazioni di spiaggia sono riportate in Fig. 8 e 9 per tempi di ritorno corrispondenti a 25 e 100 anni rispettivamente. Un dettaglio delle serie nei tre tratti lato riva è riportato nella figura 10 e mostra chiaramente il diverso livello idrico raggiunto a riva nei tre diversi casi. E' evidente, infatti, che in presenza di spiaggia non protetta il livello sarà maggiore che in presenza di una barriera sommersa; a sua volta, il livello idrico raggiunto in presenza di barriera sommersa sarà maggiore che nel caso di barriera emersa.

Il fatto di imporre nulla la velocità comporta la schematizzazione dell'onda di mare in arrivo come se si trattasse di un fenomeno di crollo di una diga. Occorre però tenere conto che la quota imposta a riva è comprensiva della marea e del vento (in questo calcolo rappresentato dai livelli CENAS, 1997), del sovrizzo indotto dall'onda e anche della risalita sulla spiaggia. La inclusione del termine dovuto alla risalita ondosa nel livello a riva significa tenere conto della energia cinetica con cui l'onda si propaga sulla spiaggia convertendo tale termine in energia potenziale della massa d'acqua. Considerando che nella zona di risalita siamo senz'altro nella ipotesi di lavoro di acque basse e che il modulo HD è basato sulle Equazioni di De Saint Venant o alle acque basse, la approssimazione che l'onda risalga la spiaggia con velocità data dalla propagazione di una massa d'acqua ferma, ma di livello energeticamente equivalente, improvvisamente rilasciata dalla linea di riva, è tutt'altro che poco accurata.

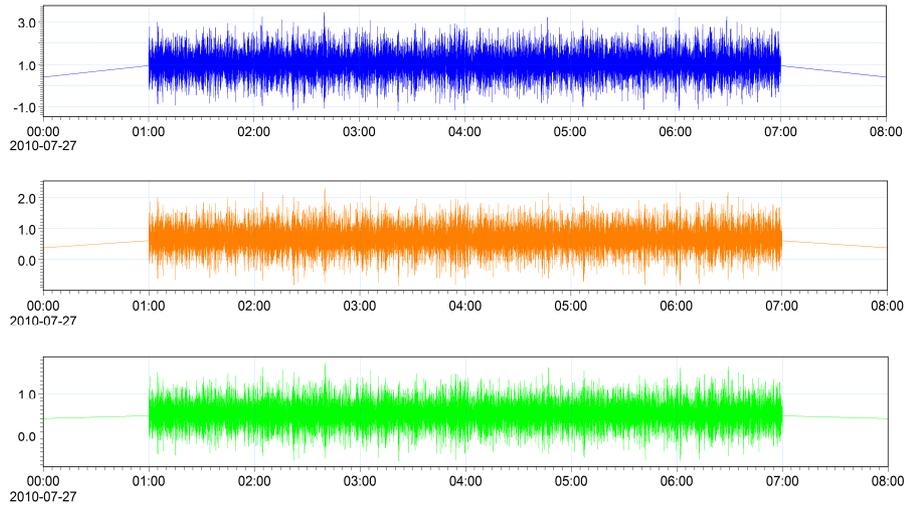


Fig. 8 Condizioni al contorno lato riva per tempo di ritorno 25 anni in caso di spiaggia libera, spiaggia protetta con barriera sommersa e con barriera emersa (procedendo dall'alto al basso).

Si noti sia in fase montante sia in fase calante la progressiva crescita/diminuzione del livello statico per raggiungere lentamente le condizioni finali.

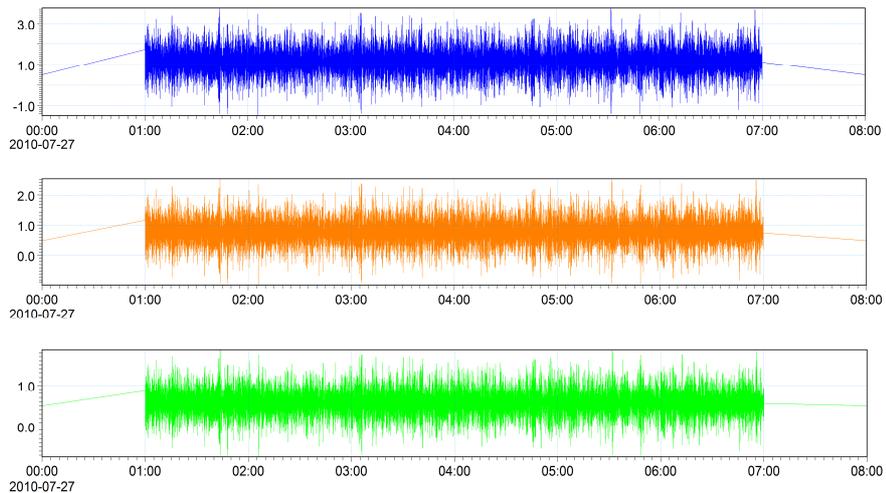


Fig. 9 Condizioni al contorno lato riva per tempo di ritorno 100 anni in caso di spiaggia libera, spiaggia protetta con barriera sommersa e con barriera emersa (procedendo dall'alto al basso).

Si noti sia in fase montante sia in fase calante la progressiva crescita/diminuzione del livello statico per raggiungere lentamente le condizioni finali.

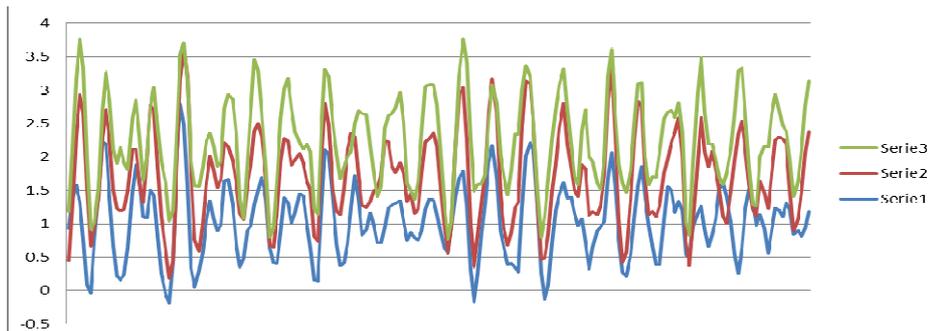


Fig. 10 Particolare delle condizioni al contorno lato riva.  
Con serie 1 si indica il livello in presenza di barriera emersa, con serie 2 il livello in presenza di barriera sommersa e con serie 3 il livello nel caso di spiaggia non protetta.

#### **4.4 Scelta degli scenari di simulazione**

Per valutare il massimo innalzamento del livello statico del mare sottocosta per assegnati livelli del tempo di ritorno, occorre aggiungere ai contributi derivanti dai fenomeni di marea quelli apportati dal sopraelevamento del livello marino sottocosta dovuto al moto ondoso (wave setup), dagli eventuali effetti del vento (storm surge), dalla subsidenza e dall'eustatismo.

L'analisi è complicata in primo luogo dal fatto che il trend della subsidenza e quello dell'eustatismo risultano difficilmente prevedibili quando si faccia riferimento al lungo periodo, come è richiesto dalle valutazioni inerenti al rischio idraulico che si riferiscono a tempi di ritorno dell'ordine dei cento anni. Per la subsidenza, infatti, oltre a quella naturale, stimabile con una discreta approssimazione, si aggiunge quella di origine antropica, che negli ultimi decenni è risultata di gran lunga preponderante e che, sul lungo periodo, è di valutazione assai incerta in quanto influenzata dalle future politiche di gestione del territorio, oggi difficilmente prevedibili. Per l'eustatismo vale un discorso analogo, in quanto, anche se è vero che esso produce effetti oggi di scarsa importanza, non è facilmente definibile il suo apporto nel lungo periodo, visti gli scenari di cambiamento climatico forniti dai modelli matematici di circolazione generale dell'atmosfera.

Infine, la valutazione dell'innalzamento del livello marino sottocosta è alquanto difficoltosa, in quanto la mancanza di lunghe serie storiche contemporanee di moto ondoso e marea non consente una stima accurata della effettiva correlazione esistente tra i due fenomeni.

Esistono tre studi di maggior rilievo cui faremo riferimento nel presente lavoro: IDROSER (1996), CENAS (1997) e il recente studio di Brath (2002).

Si riassumono nel seguito alcuni risultati principali ottenuti da tali studi in merito al livello medio e massimo del mare ed alle condizioni ondose tipiche lungo la costa Emiliano-Romagnola.

Le stime del massimo innalzamento statico (IDROSER, 1996) si basano su una complessa analisi delle osservazioni contemporanee di marea nei mareografi di Ravenna Porto Corsini e Rimini, relative al periodo 1970-1979, e delle registrazioni di moto ondoso effettuate nello stesso periodo sulla piattaforma PCB, che si trova a circa 20 km al largo di Ravenna, su un fondale di 25 m. Si riconosce un clima medio del periodo con predominanza delle direzioni ONO e ESE.

La valutazione dei massimi livelli di marea in prossimità di Porto Corsini è già stata effettuata sia nel Piano Coste della Regione Emilia Romagna, IDROSER (1996) sia nel progetto CENAS (1997).

E' da sottolineare come nessuno di questi studi consideri una statistica combinata di onde e marea.

Lo studio IDROSER considera l'effetto della marea astronomica, del vento, della pressione e del wave set-up, mentre lo studio del CENAS considera la marea astronomica e l'effetto solamente del vento. I risultati sono riportati nella Tabella 1. Come si può rilevare dal confronto la differenza è notevole e va ricercata nei diversi fenomeni considerati. L'aumento dei livelli a causa di bassa pressione, infatti, considerata nel Piano Coste, ma non nel CENAS, può essere anche superiore a 50 cm e l'aumento dovuto al wave set-up dell'ordine dei 20-30 cm.

Tr (anni)	Livello max (m s.l.m.m.)	
	IDROSER (1996)	CENAS (1997)
1	1.50	0.85
10	1.95	1.04
100	2.45	1.28

Tabella 1. Livelli estremi calcolati negli studi IDROSER (1996) e CENAS (1997).

Le stime che vengono fornite da diversi autori si riferiscono a livelli statici equivalenti che non sono tra loro direttamente confrontabili: i livelli forniti dallo studio IDROSER (1996) includono infatti il wave set-up e l'effetto dello storm surge, mentre quelli forniti dallo studio CENAS (1997) considerano il solo effetto del vento. In entrambi i casi tuttavia non si tiene conto né dell'effetto della subsidenza annuale né della possibile correlazione tra onde e maree.

Si sceglie quindi per lo studio oggetto di questa relazione di procedere ad una previa verifica della correlazione esistente tra onda e marea sulla base dei dati disponibili, al fine di accertare la accuratezza della rappresentazione separata delle due variabili stocastiche.

Per ottenere un clima che consideri il legame fra altezza, periodo, direzione dell'onda e marea è stata utilizzata la sola serie storica combinata di misure disponibile, costituita da 7 anni di misure dal 1992 al 1997 (Figura 8) presso la piattaforma PCW-A. Per una statistica di più lungo periodo sulle onde si sono considerati i dati della sola onda, sempre presso la stessa piattaforma, disponibili dal 1970 al 1997.

In Figura 8, ad ogni altezza d'onda è stata associata la direzione del vento mediata sulle 6 ore precedenti alla misura dell'onda, perché non sono disponibili misure direzionali delle onde in una serie storica sufficientemente lunga.

La distribuzione direzionale della altezza d'onda evidenzia una serie di caratteristiche legate alla fenomenologia nota dell'Adriatico settentrionale: le tempeste più frequenti provengono da settori compresi tra i 45°(Bora) ed i 135°(Scirocco), mentre le più violente interessano i settori di Bora. Un'alta percentuale di eventi con altezza d'onda non significativa (inferiore a 1.25 m), è dovuta al vento proveniente da W (Garbino).

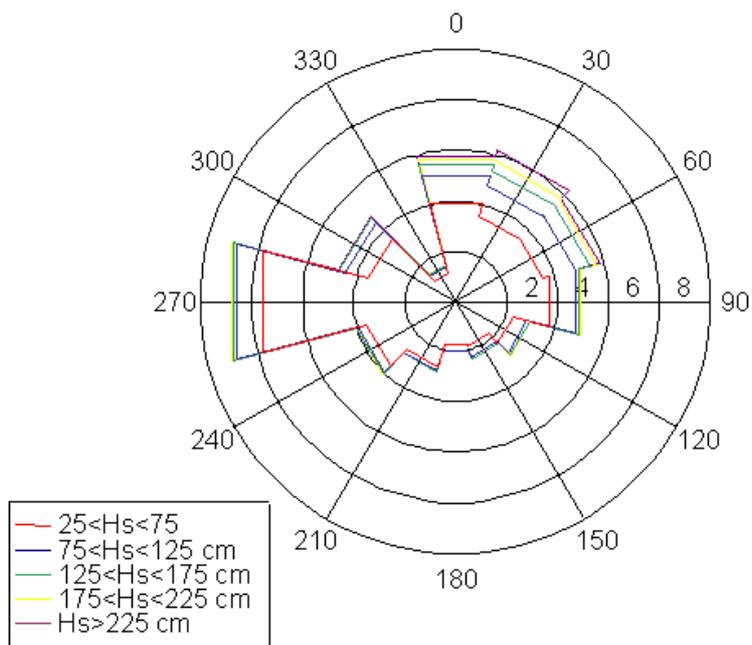


Fig. 8 Clima PCW-A, 1992/1997 - 100317 osservazioni utili.

In **Errore**. L'origine riferimento non è stata trovata.<sup>9</sup> è riportata la probabilità di accadimento di eventi congiunti onde - livelli di marea, ricavata come frequenza percentuale da osservazioni relative agli anni 1992-1997: le 91676 osservazioni sono caratterizzate da intervalli temporali di 10', 15' e 30' e coprono un intervallo effettivo di circa 60 mesi. Si nota una modesta correlazione positiva fra onda e marea.

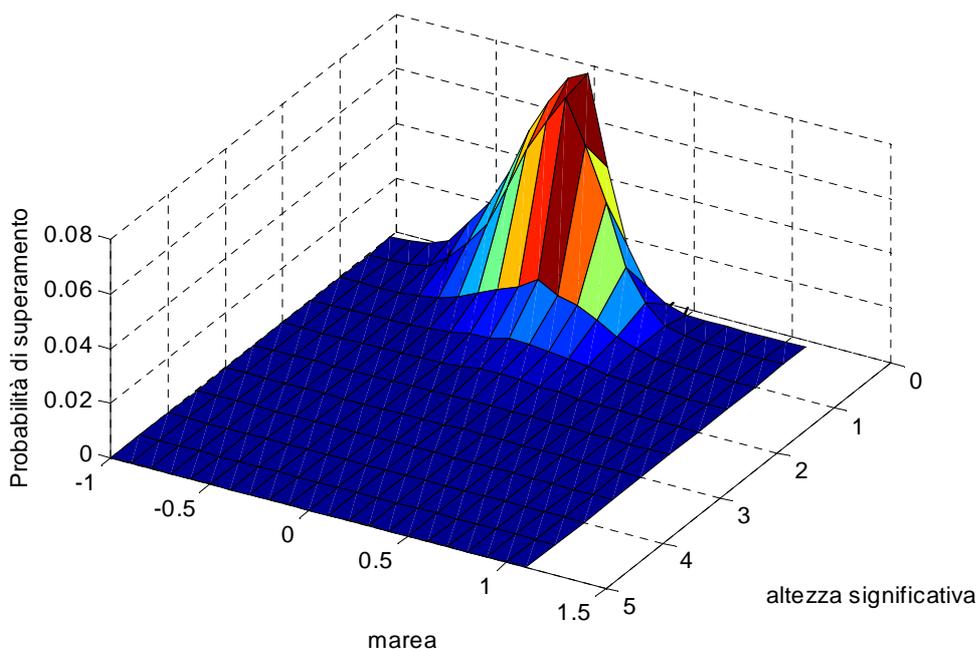


Fig. 9 Distribuzione di probabilità di altezza d'onda e marea 91676 osservazioni utili.

Data la limitata lunghezza della serie di dati disponibili (complessiva statistica su 5 anni che al massimo può pensarsi estensibile ad un tempo pari a tre volte la lunghezza della serie) e la modesta correlazione onda e marea evidenziata da tale analisi, si propende per concludere di effettuare gli scenari climatici considerando:

- di adottare scenari disaccoppiati di onda e marea sul lungo periodo nelle simulazioni di inondazione in pianta;
- di adottare scenari combinati di onda e marea sul breve periodo nelle simulazioni previste su singoli transetti;
- di trascurare la direzionalità dell'onda per assumere in ogni caso onde perpendicolari alla costa, condizione di norma più gravosa per la assenza di schermatura ai varchi delle scogliere rispetto all'onda incidente;
- di trascurare gli effetti della subsidenza e del rimodellamento di spiaggia, stante la sostanziale incertezza di questi elementi. Gli effetti dell'alterarsi della spiaggia emersa (larghezza e altezza di spiaggia, altezza e pendenza della duna/argine a mare ove presente) saranno considerati nella modellazione matematica monodimensionale.

Per la stima del livello del mare si adotta lo studio del CENAS, che considera la marea astronomica e l'effetto del vento. Le condizioni ondose sono derivate dallo studio statistico dei dati alla PCW-A, anni 1970-1983.

Simbolo	Tr=1 anno	Tr=10 anni	Tr=25 anni	Tr=100 anni
$Z_m$ , m	0.85	1.04	1.14	1.28
$H_{so}$ , m	3.5	4.9	5.4	6.2
$T_{so}$ , s	8.4	9.6	10.1	10.7

Tabella 2. Scenari disaccoppiati di onda e marea da sottoporre ad esame. Livelli desunti da CENAS (1997). Onde derivate dallo studio statistico dei dati alla PCW-A, anni 1970-1983.

#### 4.5 Risultati

I risultati che di seguito si riportano sono relativi agli scenari caratterizzati da livelli idrici con tempo di ritorno 25 e 100 anni. Ci si pone nella situazione di assenza della duna invernale. Si ricordi che durante la modellazione si sono considerate chiuse le porte Vinciane, dunque non si è considerata l'influenza del porto canale e una sua eventuale esondazione.

La inondazione da mare inizia a verificarsi non appena all'innalzamento progressivo di livello del mare -fino al livello corrispondente al tempo di ritorno di 25 anni (in 1 h)- si combina l'azione dell'onda.

Al tempo pari a 1h10', si nota come già tutta la zona delle colonie a Nord del pennellone Nord sia stata raggiunta dalle onde, e la inondazione si stia rapidamente propagando, con velocità di circa 1.0 m/s e quote superiori a 1 m, alla prima fila di case prospicienti la barriera sommersa in sacchi. Solo brevi tratti di spiaggia a Sud del molo

Sud sono allagati, stante la efficace azione di contenimento svolta dalle barriere.

Al tempo pari a 1h40', l'inondazione si propaga fino all'isolato più a Nord dell'abitato Nord e alla strada retrostante la prima fila di case (con velocità sempre molto elevate, 1.0 m/s, e quote fino a 1.7 m), e a Sud interessa più ampi tratti di spiaggia senza tuttavia oltrepassare la prima fila di case (con quote e velocità inferiori, 0.8 m e 0.7 m/s rispettivamente).

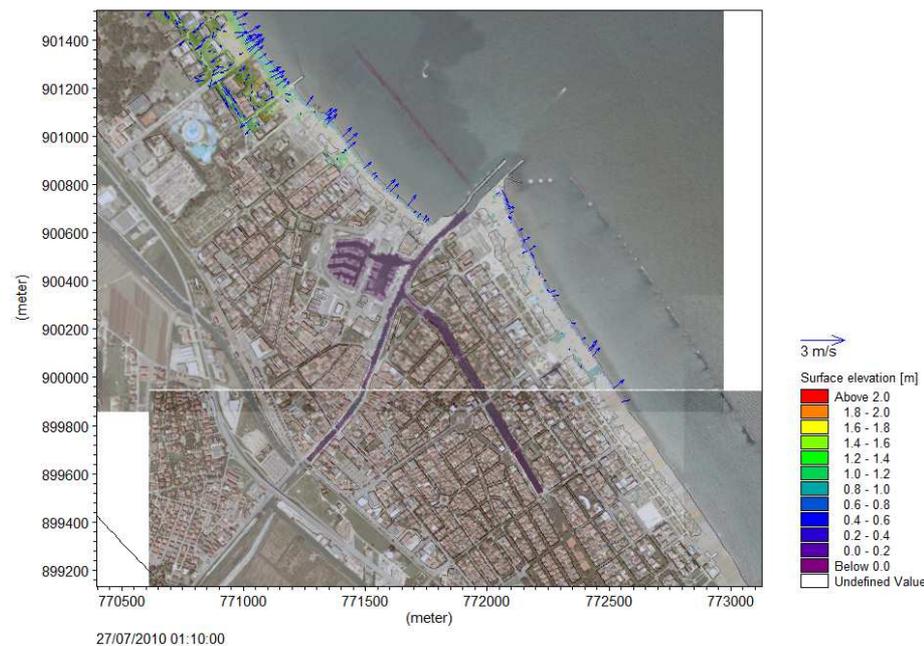
Al tempo pari a 2h10' l'allagamento interessa quasi per intero la prima traversa da Nord dell'abitato Nord e inizia anche a propagarsi nella seconda traversa e raggiunge le case più a Nord retrostanti la prima fila.

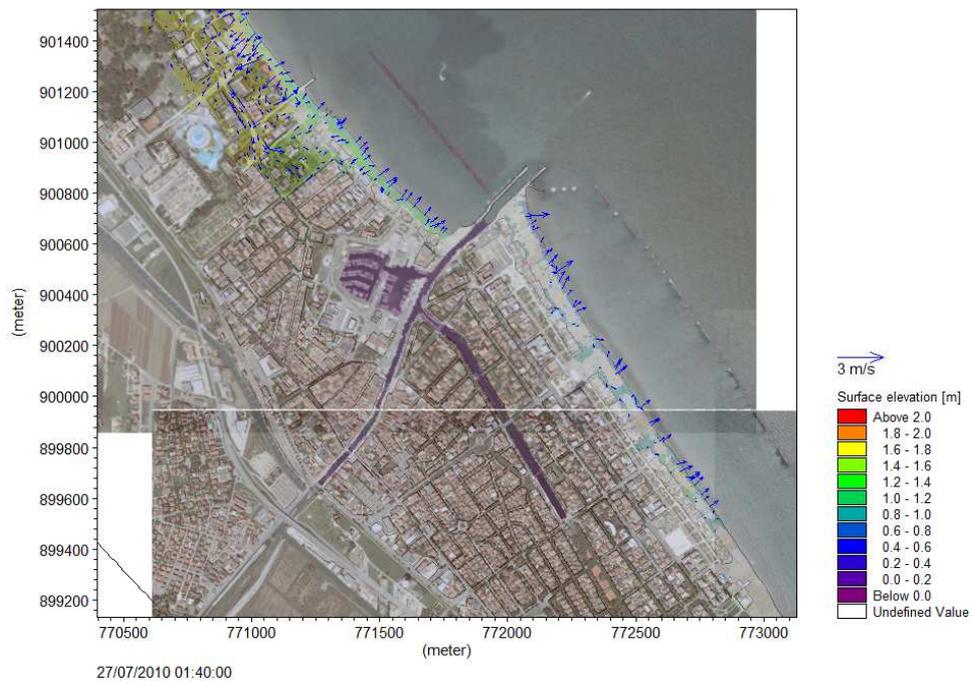
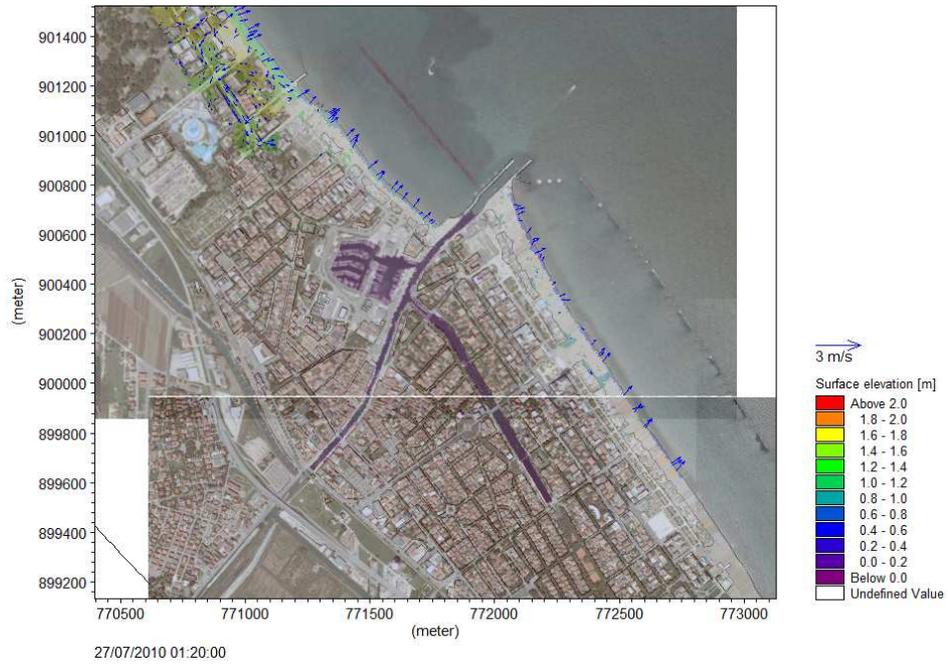
Al tempo pari a 2h 25', la porzione più a Nord della strada retrostante la prima fila di case dell'abitato Sud viene allagata e l'onda raggiunge la seconda fila di case con velocità prossime a 0.4 m/s e quote medie di 0.5 m.

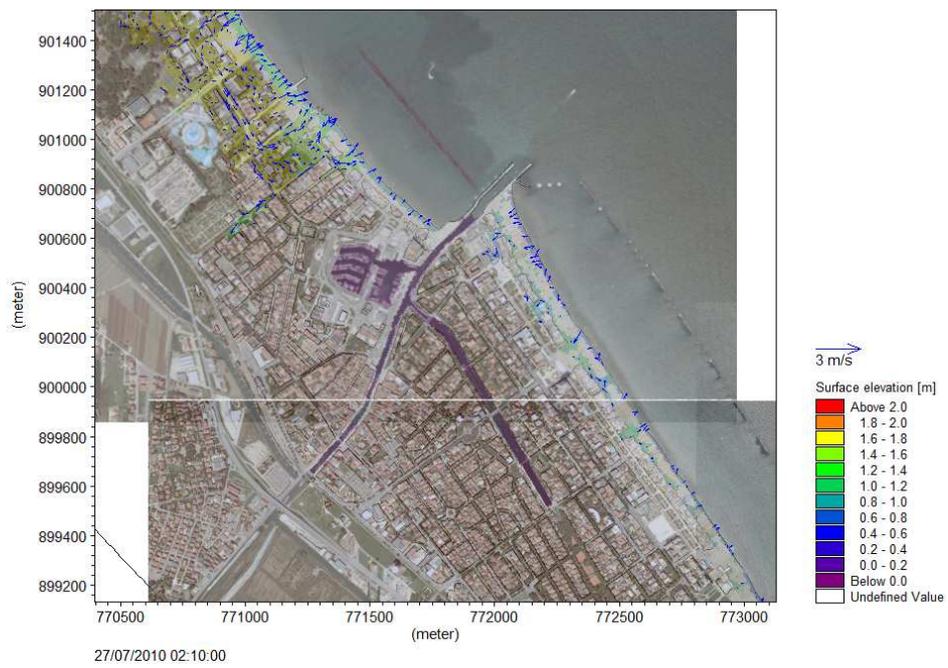
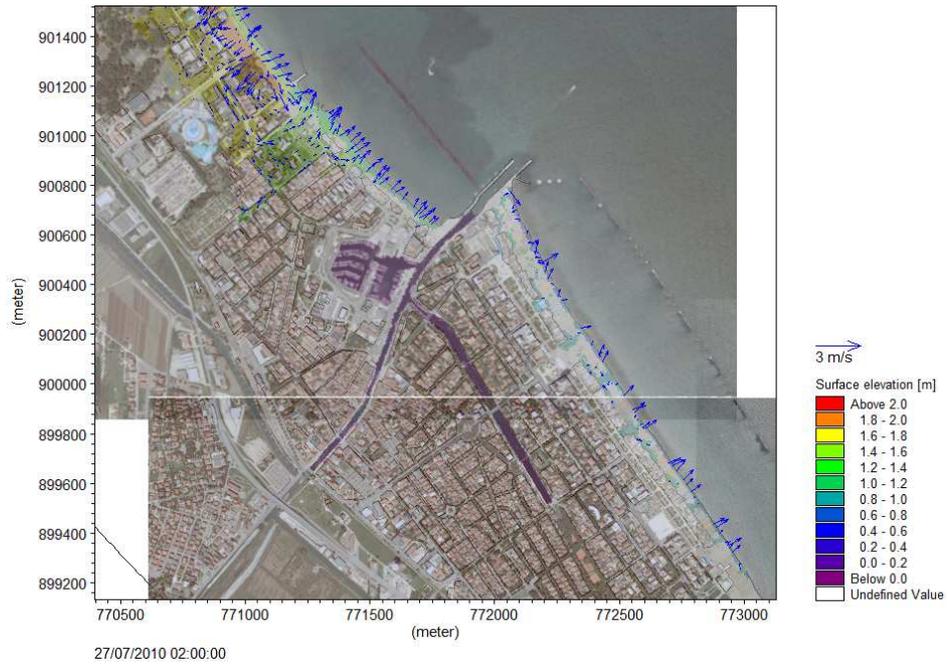
L'istante pari a 2h40' fotografa un momento di picco per quote e velocità della inondazione: nella zona delle colonie,  $h=1.7-2.1$  m e  $v=1-2$  m/s; nell'abitato Nord (in cui peraltro la inondazione si è ulteriormente propagata lungo le due strade parallele alla lungomare),  $h=0.9-1.4$  m e  $v=0.5-2.0$  m/s; nell'abitato Sud (ove la inondazione non si è ulteriormente propagata verso l'interno),  $h=0.6-1.2$  m e  $v=0.5-2.0$  m/s.

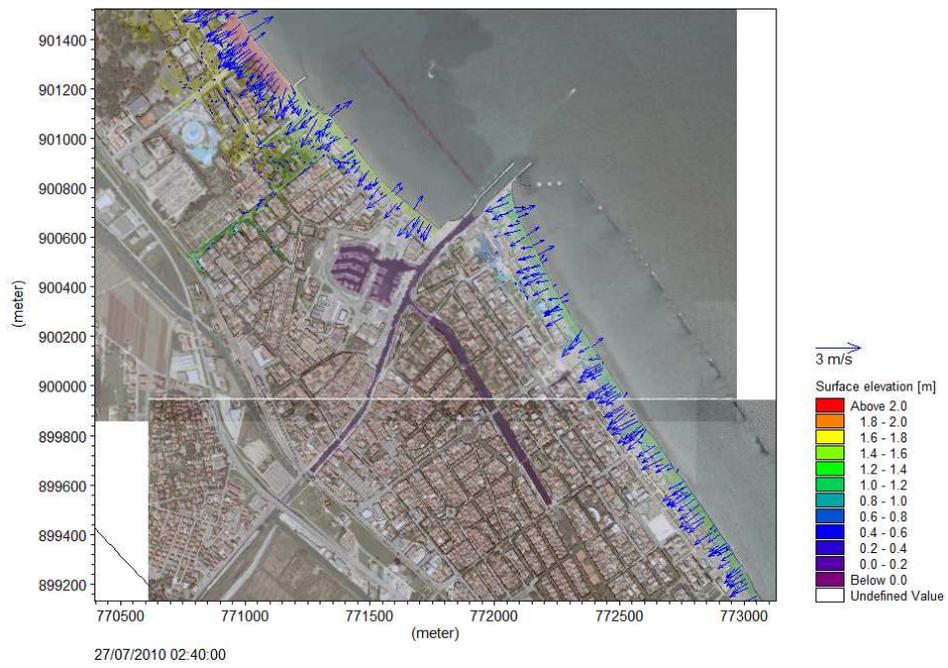
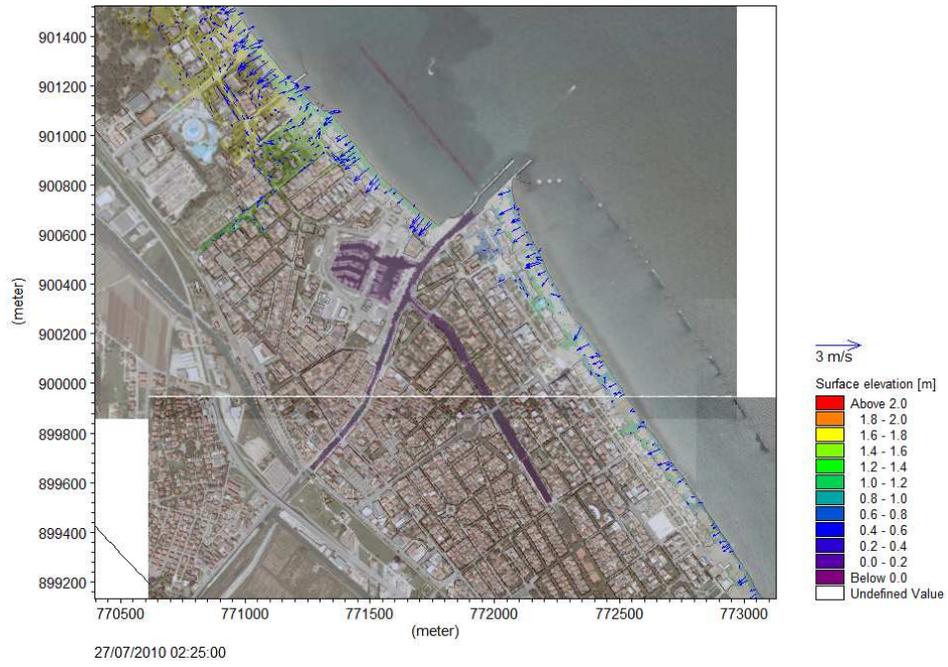
Le caratteristiche della inondazione non mutano sostanzialmente nel seguito; l'abitato Sud risulta sostanzialmente protetto a meno delle prime due file di case immediatamente a Sud del molo. La zona Nord è decisamente più esposta, in particolare la zona delle colonie ove la inondazione è estremamente severa, mentre l'abitato Nord è interessato parzialmente (nella zona Nord, compresa tra i primi tre isolati da Nord e la darsena).

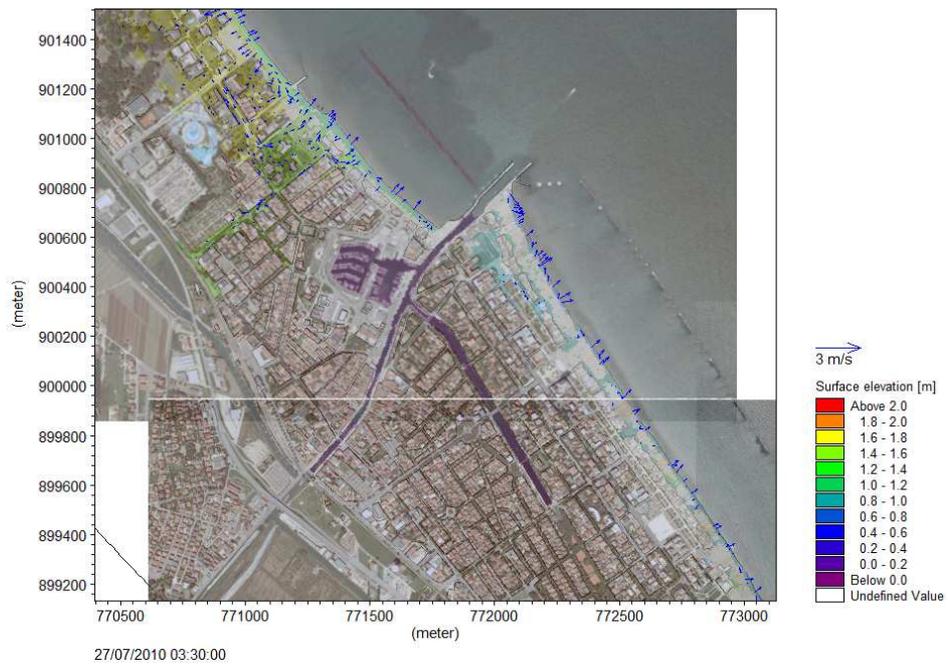
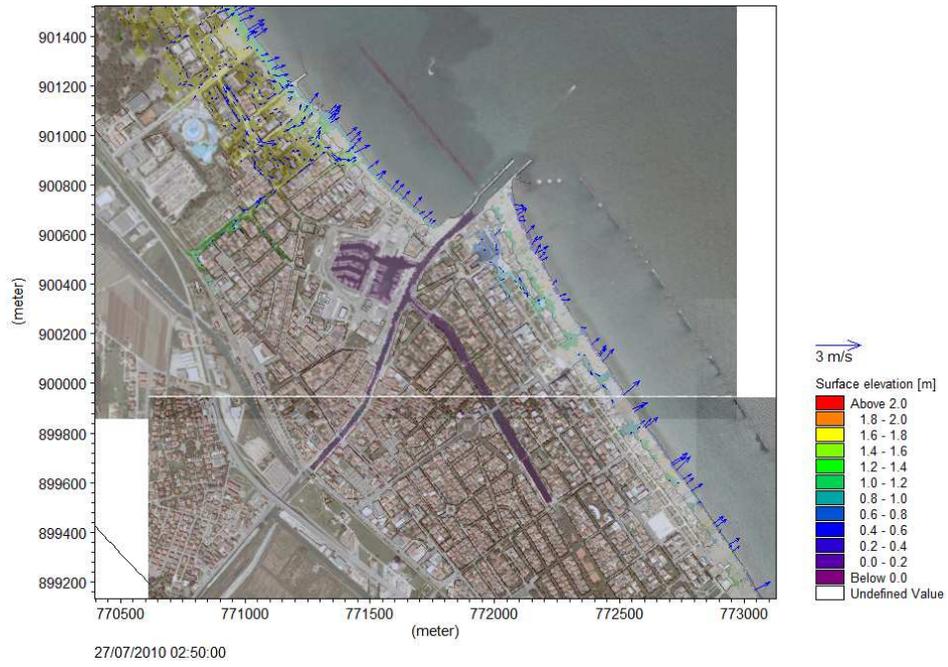
Qui di seguito si riportano dei fotogrammi a determinati tempi che mostrano l'evolversi dell'inondazione:

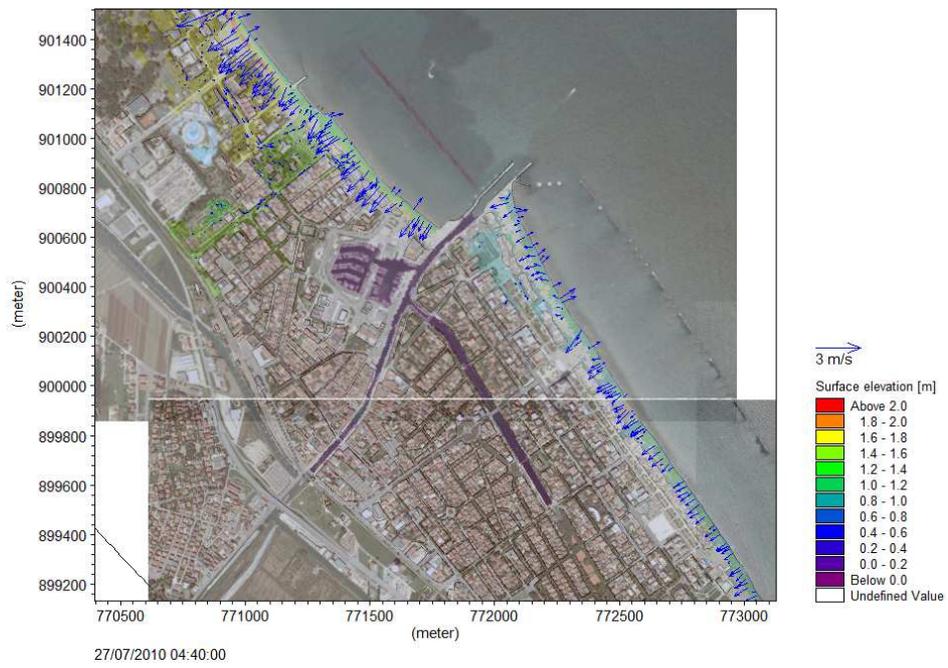


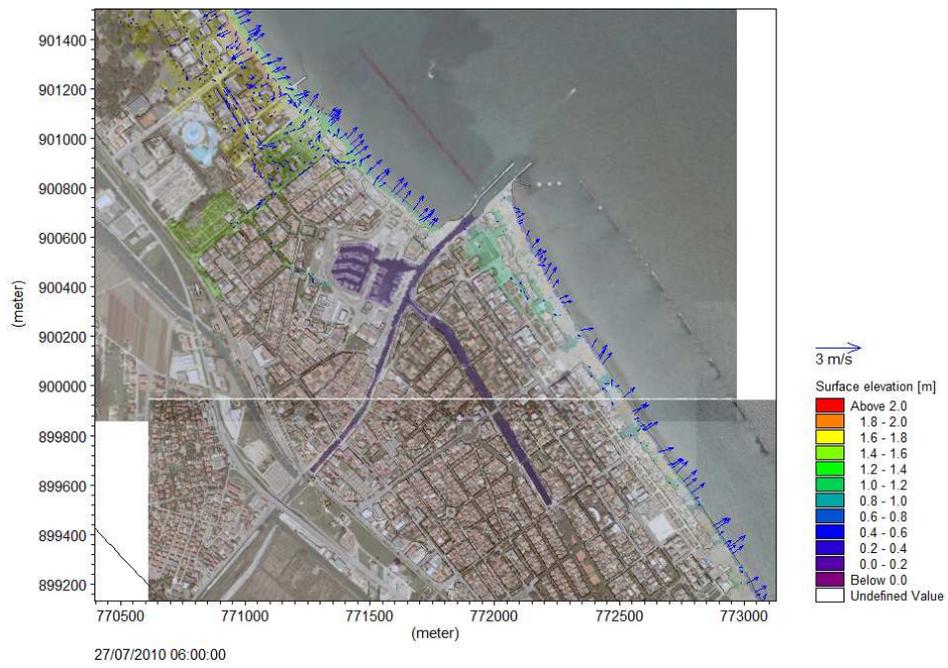
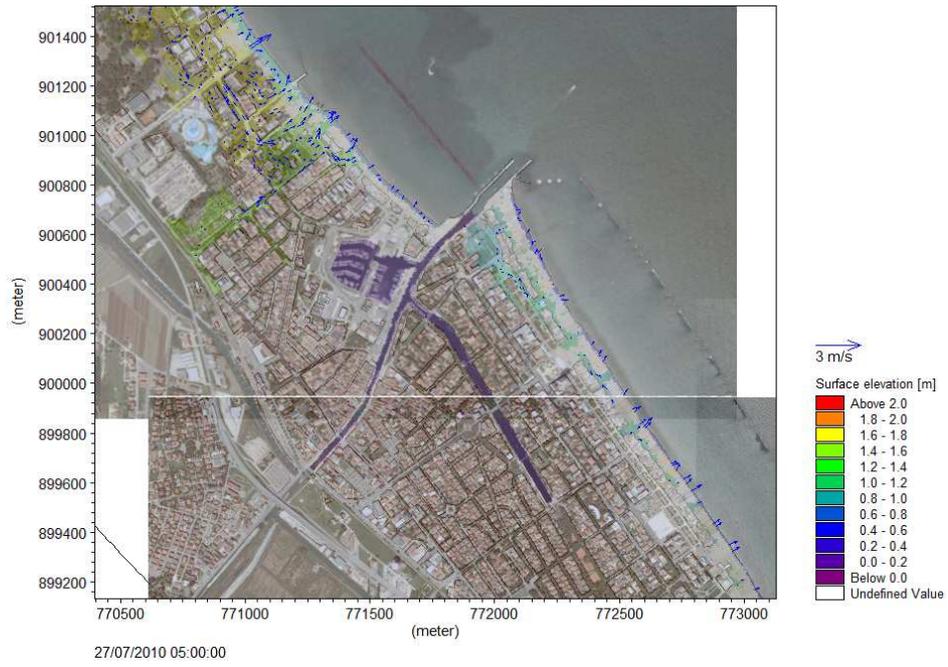


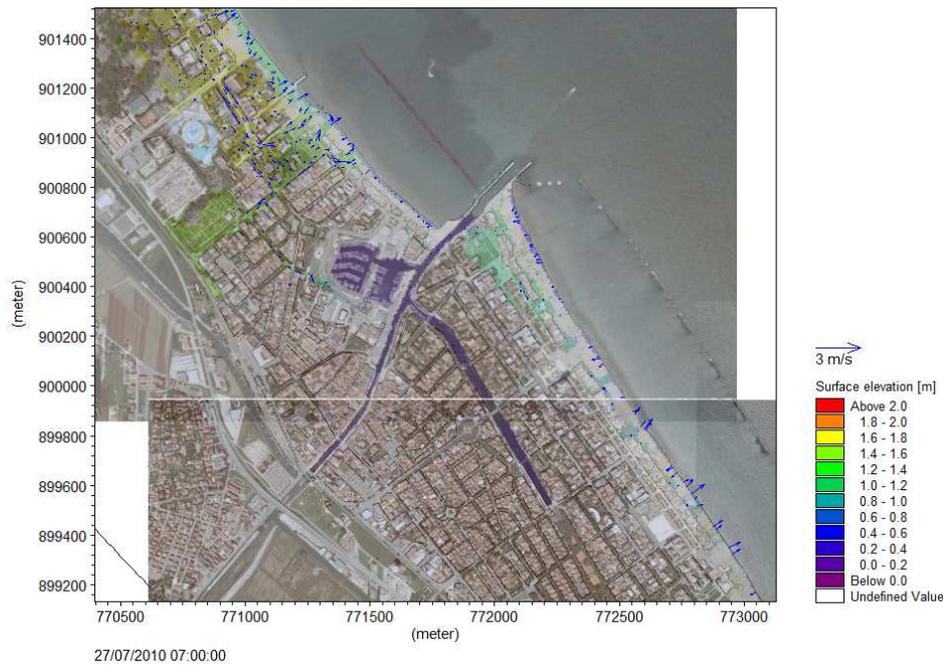












Poniamoci ora nello scenario con tempo di ritorno pari a 100 anni e senza il cordone dunale invernale.

La inondazione da mare inizia a verificarsi, in corrispondenza della spiaggia libera, già al tempo 50', ossia quando il livello statico ha raggiunto una quota di 1.5 m circa. Dalla sezione del pennellone rapidamente penetra (si veda il tempo pari a 1h10', la rapidità è da imputarsi alla azione combinata dell'onda a partire dall'istante 1h00') verso la spiaggia Nord protetta dalla barriera sommersa.

Al tempo pari a 1h20', tutta la zona delle colonie a Nord del pennellone Nord è stata raggiunta dalle onde, con quote comprese tra 1.6 e 2.1 m; la inondazione si sta rapidamente propagando, con velocità di circa 1.0 m/s e quote pari o superiori a 1 m, alla prima traversa da Nord e al primo isolato. Tutta la spiaggia sia a Nord sia a Sud è sommersa sino alla prima fila di case.

Al tempo pari a 1h50', l'inondazione si propaga lungo la prima e la seconda traversa da Nord, con velocità sempre elevate, 1.0 m/s, e quote fino a 1.7 m; a Sud l'allagamento si estende, nella zona più prossima al molo, sino alla seconda fila di case, e dalla spiaggia interessa vari tratti della strada lungomare, con quote di circa 1 m e velocità medie di 0.8 m/s.

L'istante pari a 2h00' –come nel caso di  $Tr=25$  anni con duna invernale- fotografa un momento di picco per quote e velocità della inondazione: nella zona delle colonie,  $h=1.7-2.3$  m e  $v=1-2$  m/s; nell'abitato Nord (in cui peraltro la inondazione è rimasta limitata alla prima traversa e alla prima fila di case),  $h=0.9-1.4$  m e  $v=0.5-2.0$  m/s; nell'abitato Sud (ove la inondazione non si è ulteriormente propagata verso l'interno),  $h=1.1-1.3$  m e  $v=0.5-2.0$  m/s.

Al tempo pari a 4h10' la quota d'acqua lungo la prima fila di case dell'abitato Nord è prossima a 2 m, l'allagamento raggiunge la darsena lungo la terza strada (dalla spiaggia) parallela al lungomare fino in prossimità del molo, e le prime due traverse sono interessate dal

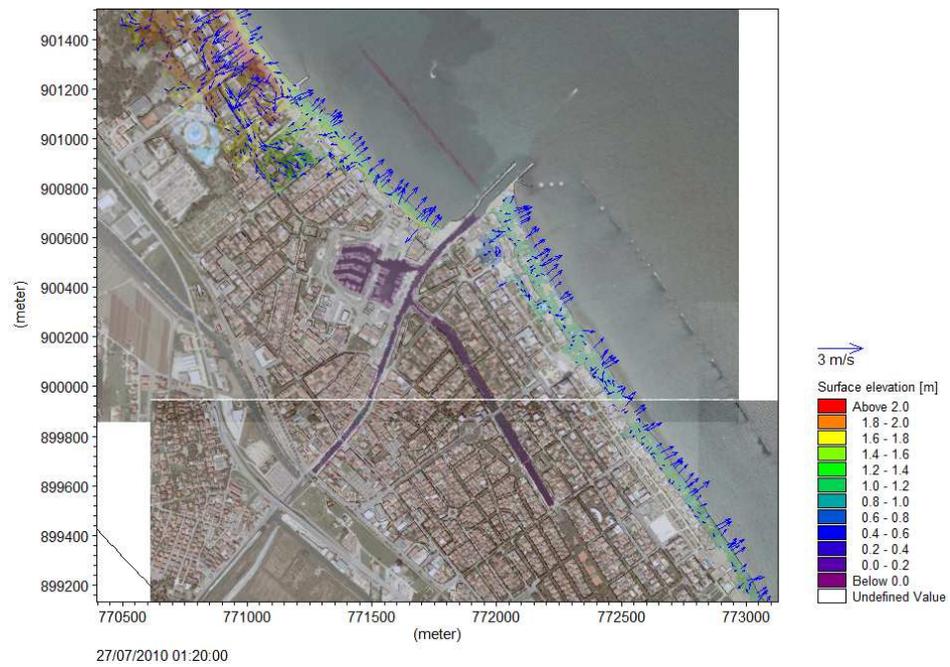
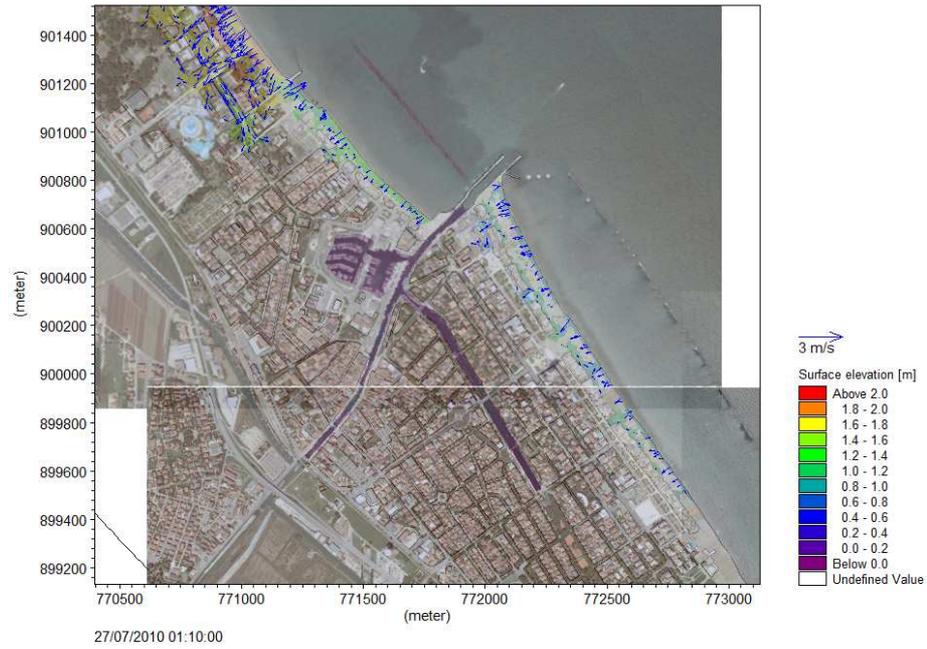
progredire dell'acqua, che di fatto lambisce nella parte più a Nord l'abitato fino alla zona periferica.

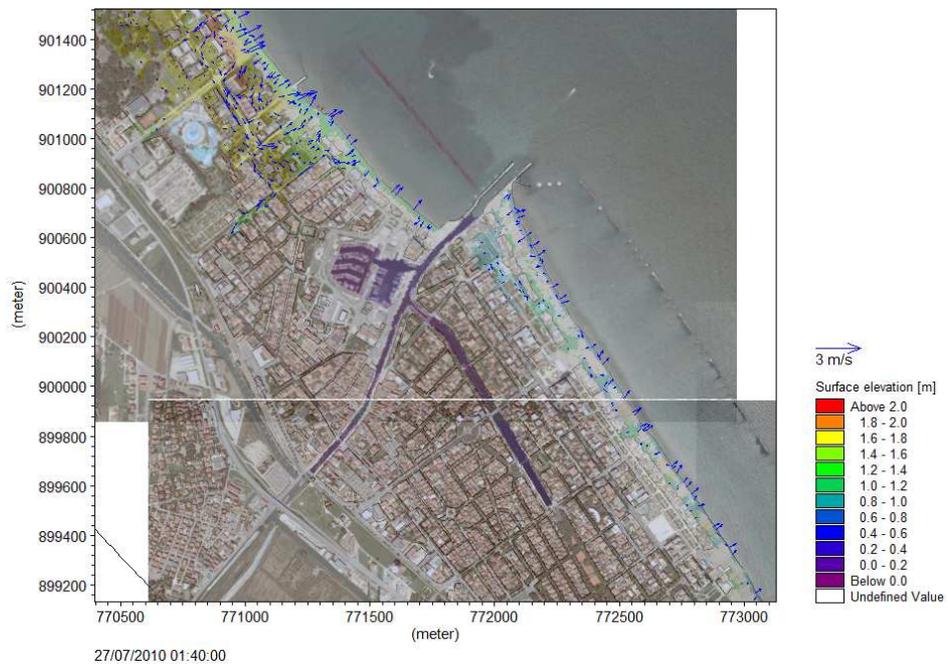
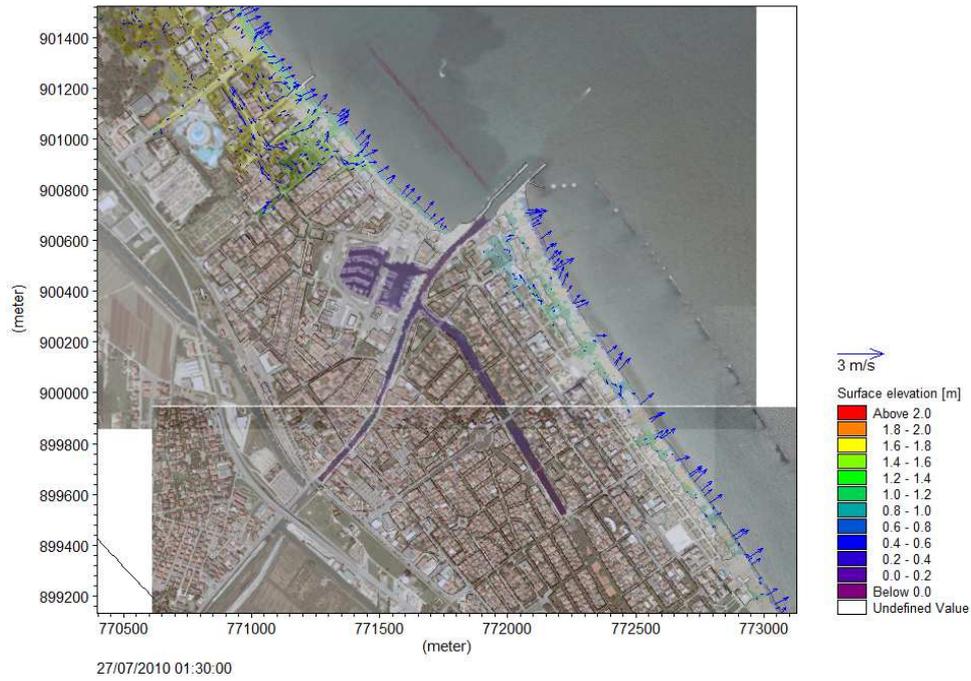
Al tempo pari a 5h25' tutta la zona delle colonie è sommersa di 1.8-2.2 m d'acqua. Le condizioni di inondazione dell'abitato Nord non peggiorano, in termini di quote e velocità, ma l'inondazione raggiunge il rilevato ferroviario.

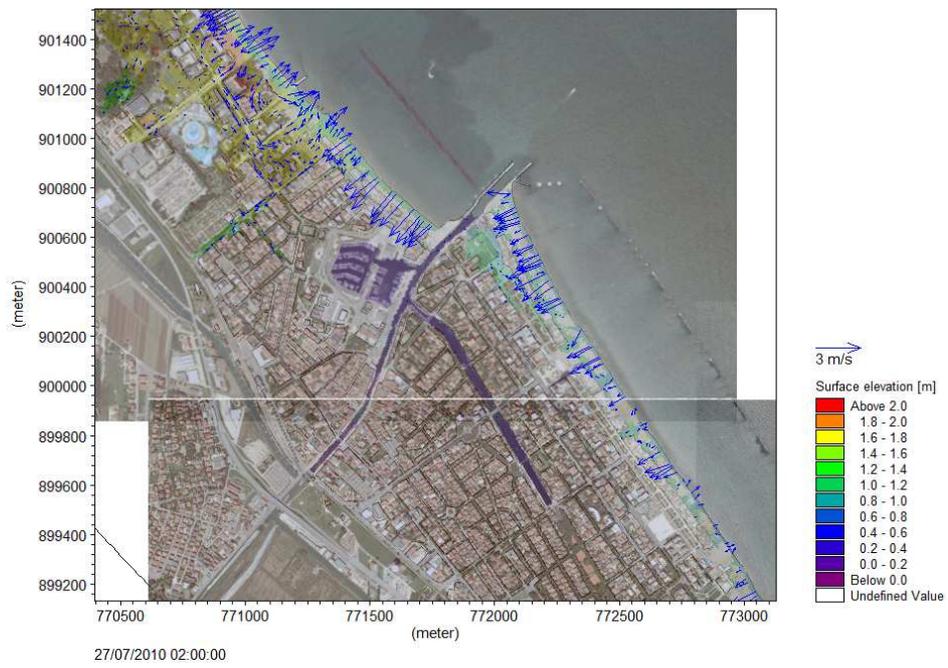
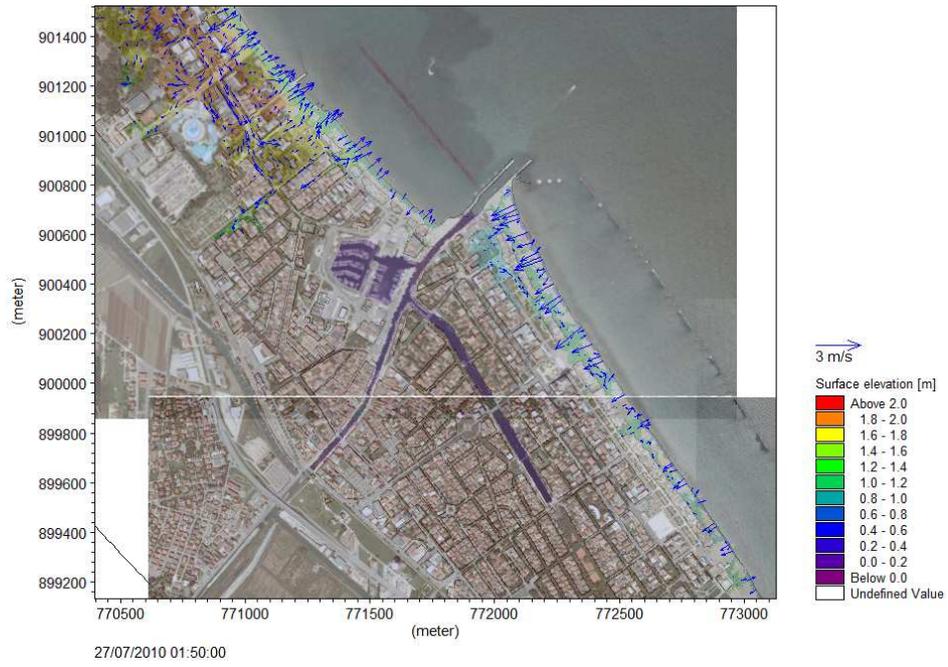
L'istante di picco delle velocità sulla spiaggia (pari e superiori a 3 m/s) si mostra nel grafico corrispondente al tempo 6h00'.

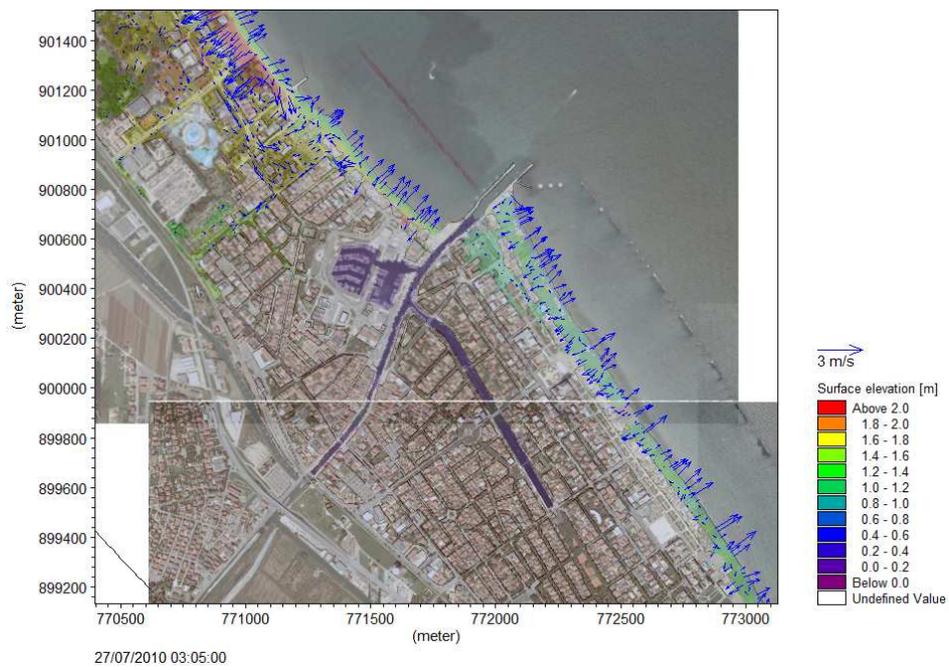
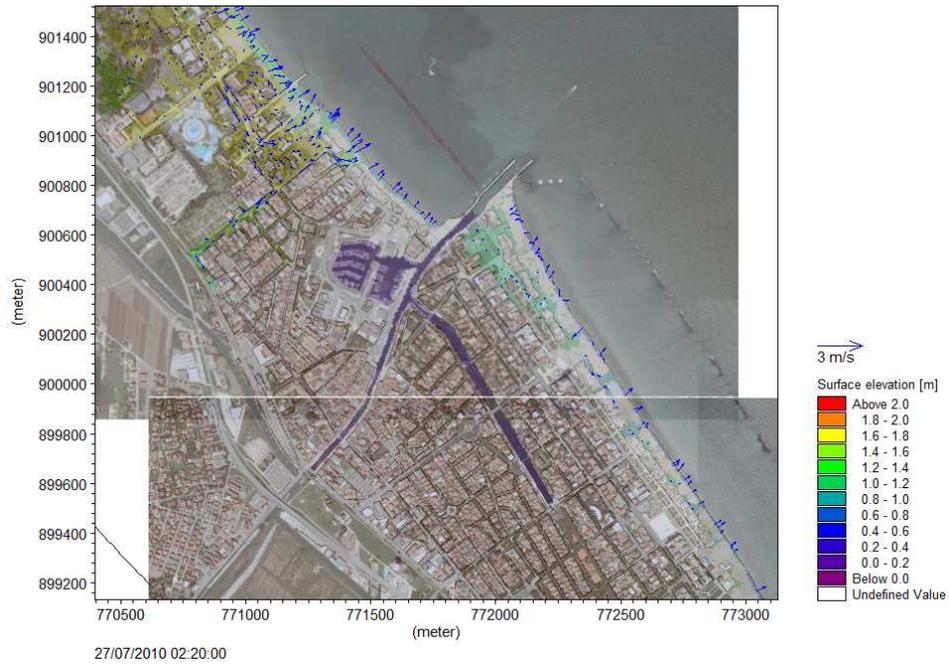
Come solito, si vedano i fotogrammi seguenti:

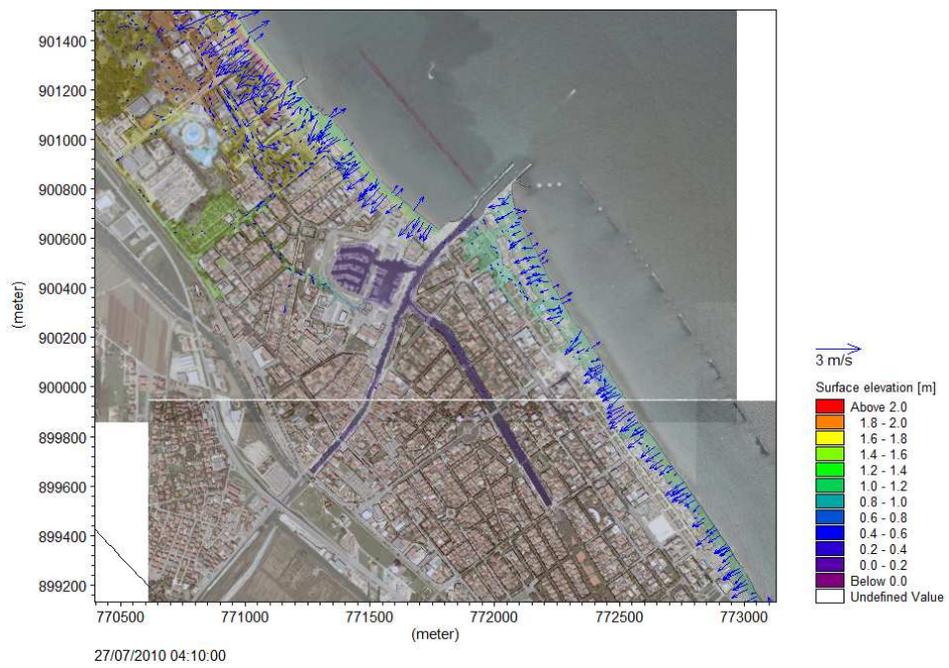
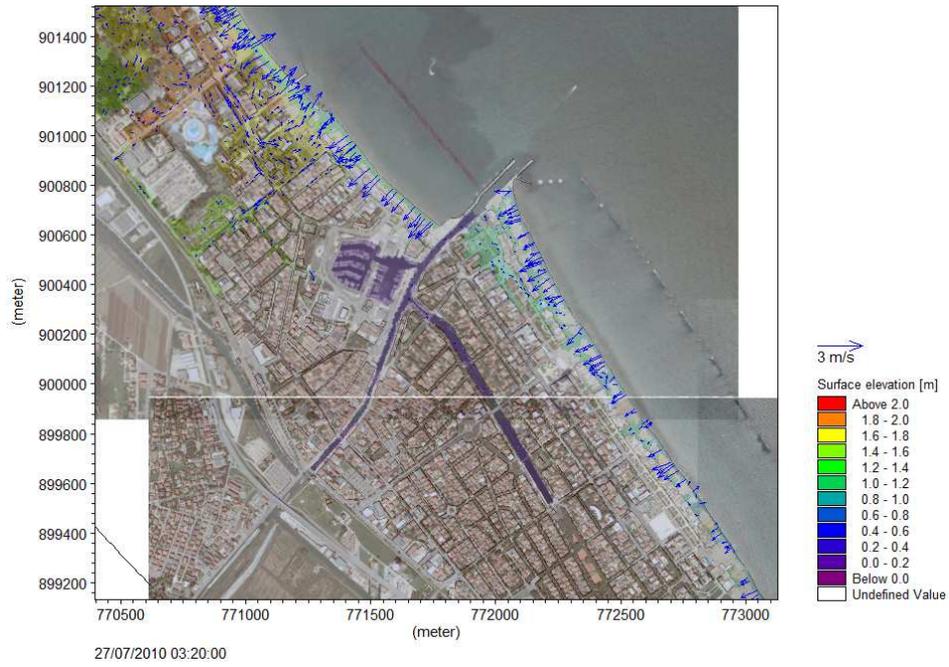


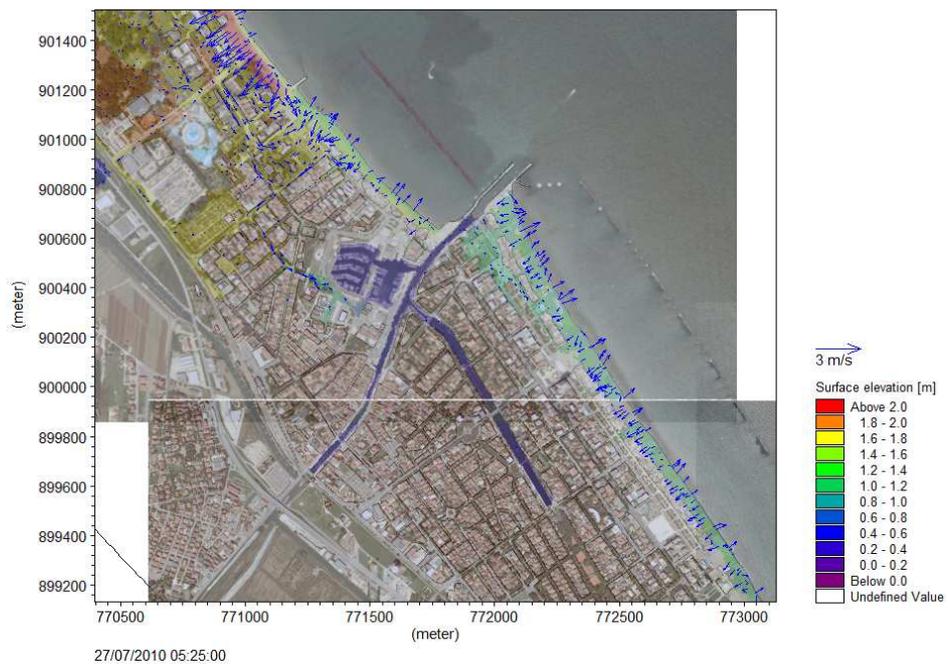
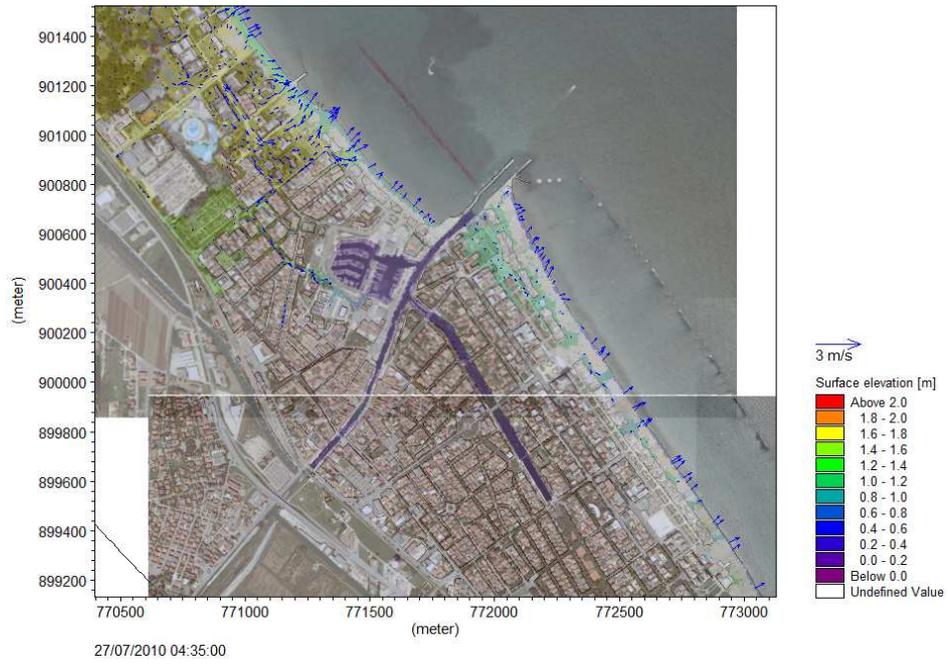


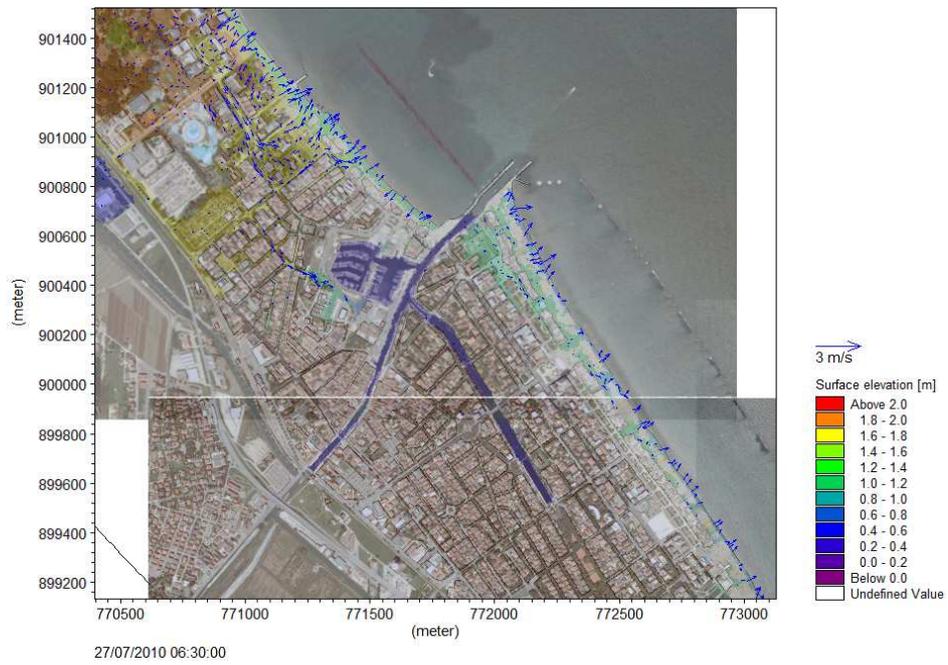
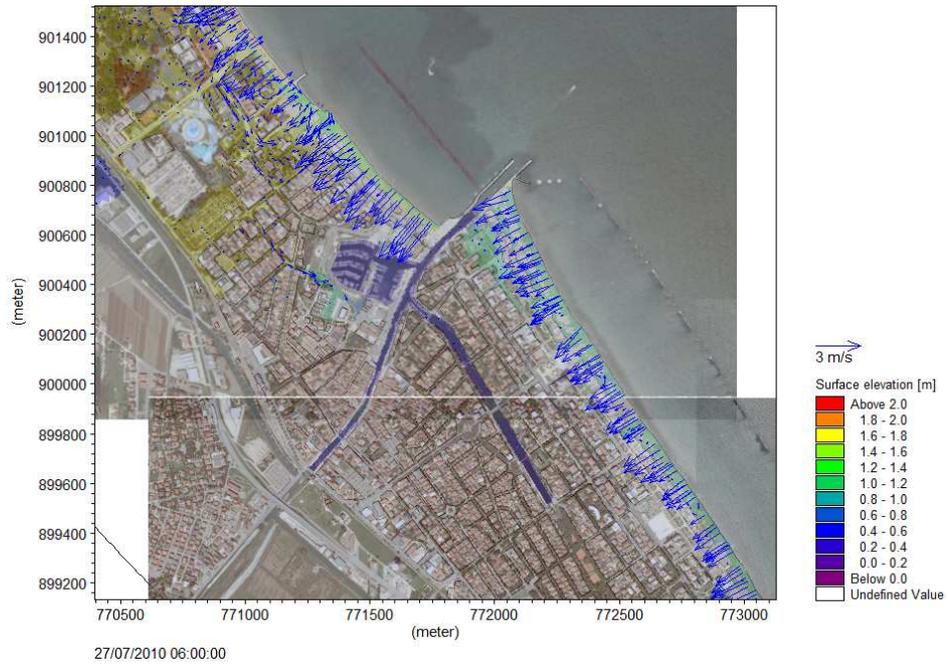


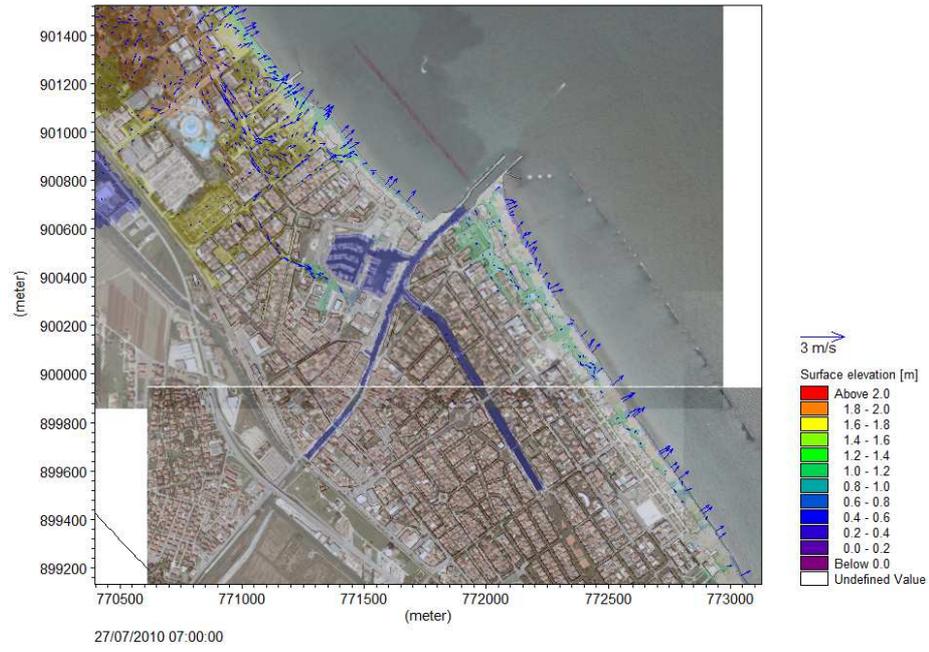












# CONCLUSIONI

Dall'analisi condotta, è evidente quanto sia rilevante il problema della vulnerabilità all'ingressione marina nel litorale emiliano-romagnolo; è altrettanto evidente, anche se non immediato, che le cause siano da attribuire al fenomeno dell'erosione costiera e della subsidenza.

Nella località di Cesenatico, infatti, l'erosione costiera, che in passato ha portato all'asporto di grandi quantità di materiale sabbioso dalla riva, è stato pressoché arrestato, o comunque fortemente limitato, tramite l'introduzione delle barriere a Nord e a Sud del porto canale.

Il tasso di subsidenza, cresce costantemente negli anni, anche se nel decennio 1990-2000 ha avuto velocità nettamente inferiori rispetto a quello precedente.

I frequenti fenomeni di inondazione del centro abitato di Cesenatico hanno portato le amministrazioni locali a ricercarne le cause e i possibili rimedi; tra questi si è avuta l'installazione delle porte Vinciane nel porto canale, a sufficiente distanza dal centro storico in modo da ridurre il più possibile l'impatto paesaggistico.

Si è potuto notare, e ciò è anche del tutto intuitivo, come lo scenario caratterizzato da un tempo di ritorno di 100 sia decisamente più critico di quello caratterizzato da un tempo di ritorno di 25 anni.

La differenza nelle velocità e nei livelli idrici raggiunti nei due casi è da attribuire al contributo di storm-surge. La simulazione, infatti, prevede che si abbia un periodo iniziale di innalzamento e assestamento del livello idrico (per la prima ora circa) per poi dare inizio all'ingressione evidente tramite gli impulsi d'onda dovuti allo storm-surge stesso.

In entrambi i casi, tuttavia, è evidente che l'abitato a Sud del porto canale è decisamente più protetto di quello a Nord, a causa della presenza delle barriere emerse, che dunque confermano la loro efficacia per quanto riguarda la trasmissione a tergo delle stesse.

Lo studio è stato condotto considerando l'assenza del contributo di piena a monte del porto canale e questo potrebbe essere un risvolto interessante da approfondire in un eventuale sviluppo successivo dell'analisi di questo fenomeno.

Considerando quindi che sotto le condizioni di clima meteo marino rilevato a Cesenatico l'ingressione marina all'interno dell'abitato assume risvolti piuttosto critici, è necessario individuare sistemi di protezione dell'abitato stesso, siano essi intesi come azioni a livello pianificativo che a livello ingegneristico.

Probabili prospettive future che si pensa possano essere realizzate a Cesenatico per mitigare l'inondazione del centro abitato risiedono nello smantellamento del nucleo di colonie situate a Nord del porto canale,

dunque di quella parte di edifici più gravemente colpiti dall'inondazione, e in una possibile riedificazione più nell'entroterra, in corrispondenza di aree ad oggi ancora caratterizzate da ambiente semi-boschivo.

# Bibliografia

- M. Preti, N. De Nigris, M. Morelli, M. Monti, F. Bonsignore, M. Aguzzi, “Stato del litorale emiliano-romagnolo all’anno 2007 e piano decennale di gestione”, Arpa Emilia Romagna, 2009.
- L. Perini, L. Calabrese, “ Il sistema mare-costa dell’Emilia-Romagna”, Pendragon, 2009.
- L. Martinelli, C. Corbeau, B. Zanuttigh, “ Mapping Flood hazard along the Emilia Romagna Littoral, Italy”.
- ABI, “Coastal Flood Risk- thinking for tomorrow, acting today”, Entec, 2006.
- Safecoast, “Coastal flood risk and trends for the future in the north sea region”.
- B. Zanuttigh, “Studio modellistico di vulnerabilità idraulica alla ingressione marina a Cesenatico”.
- E. Lancioni, “ Modellazione numerica bidimensionale del comportamento di un artificial surfing reef per la difesa ecosostenibile della costa a Misano Adriatico (RN)”, Tesi di Laurea, 2008/2009.
- Fonti internet:
  - [it.wikipedia.org](http://it.wikipedia.org);
  - [www.poolmeccanica.it](http://www.poolmeccanica.it).



# ***RINGRAZIAMENTI***

*Rivolgo un ringraziamento particolare alla Professoressa Zanuttigh che mi ha fatta appassionare a questo ambito dell'ingegneria e soprattutto che mi ha seguita con estrema attenzione, comprensione e pazienza per questo secondo lavoro che mi ha permesso di svolgere.  
Ringrazio Andrea per i preziosi consigli.*

*Sono giunta al termine dell'esperienza universitaria, dopo cinque bellissimi anni.*

*Mi sento dunque di ringraziare coloro che l'hanno resa possibile.*

*Alla mia famiglia: regalandomi il vostro impegno, il vostro sostegno e la vostra pazienza avete permesso che io attraversassi questo percorso sapendo sempre dove guardare per non perdermi e dove appigliarmi per non cadere.*

*Ai miei amici e alle mie amiche: a quelli che lo sono stati sempre, a quelli persi e poi ritrovati, a quelli che lo sono diventati. Avete sempre una parola di conforto e un sorriso da donarmi, e per questo vi sono grata.*

*A Jacopo: tu sai. E lascerò che questo parli per me.*

*A Lorenzo: perché ci sei, e sei tutto.*

*A tutti, grazie di cuore.*