

Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Corso di Laurea Magistrale in SCIENZE AMBIENTALI

Realizzazione di un modello di simulazione per la previsione futura delle spiagge della Versilia

| Relatore: | |
|------------------------------|-------------|
| Prof. Ing. Lorenzo Cappietti | |
| | |
| Correlatore: | |
| Prof. Enzo Pranzini | |
| | Candidata: |
| | Lisa Bonomi |
| | |
| Controrelatore: | |

Anno Accademico 2011 - 2012

Prof. Michele Marroni

Indice

| 1 | Le | cos | te | 1 |
|---|-------|-------|---|-----------|
| | 1.1 | Tip | i di coste e caratteristiche | 1 |
| | 1.2 | Bila | ancio sedimentario | 4 |
| | 1.3 | Cau | use dell'erosione costiera | 6 |
| 2 | II i | moto | o ondoso | 13 |
| | 2.1 | De | finizioni e generalità | 13 |
| | 2.2 | Tip | ologie di onde | 14 |
| | 2.3 | Str | umenti ondametrici | 16 |
| | 2.4 | Ret | te ondametrica in Italia | 18 |
| | 2.4 | .1 | Boa ondametrica di La Spezia e disponibilità di dati | 21 |
| 3 | De | escri | zione quantitativa del moto ondoso | 23 |
| | 3.1 | An | alisi statistica a breve termine | 23 |
| | 3.1 | .1 | Analisi zero crossing o nel dominio del tempo | 24 |
| | 3.1 | .2 | Analisi nel dominio della frequenza | 28 |
| | 3.2 | Spe | ettro direzionale | 33 |
| 4 | Pr | opa | gazione del moto ondoso da largo a costa | 35 |
| | 4.1 | Suc | ddivisione funzionale della fascia costiera | 35 |
| | 4.2 | De | scrizione qualitativa della variazione dei parametri caratteristici | dell'onda |
| | da la | rgo a | costa | 36 |
| | 4.3 | De | scrizione dei fenomeni che interessano la propagazione da largo a | costa.37 |
| | 4.3 | .1 | Shoaling | 38 |
| | 4.3 | .2 | Rifrazione | 39 |
| | 4.3 | | Frangimento | |
| | 4.3 | | Diffrazione | |
| | 4.3 | .5 | Riflessione | 41 |

| 5 | Sist | tema di circolazione costiera indotto dal moto ondoso | 42 |
|---|-------|---|----|
| | 5.1 | Dinamiche cross – shore | 42 |
| | 5.2 | Dinamiche longshore | 44 |
| | 5.3 | Morfodinamica del profilo di costa | 45 |
| | 5.3. | 1 Fascia attiva e profondità di chiusura | 47 |
| | 5.3.2 | 2 Profilo di equilibrio di una spiaggia | 47 |
| | 5.4 | Trasporto solido litoraneo | 48 |
| 6 | Ор | ere di protezione della costa | 50 |
| | 6.1 | Classificazione delle opere costiere | 50 |
| | 6.2 | Le opere di tipo rigido | 52 |
| | 6.2. | 1 Seawall | 52 |
| | 6.2.2 | 2 Barriere parallele distaccate | 53 |
| | 6.2.3 | 3 Pennelli | 54 |
| | 6.3 | Le opere di tipo morbido: i ripascimenti | 56 |
| 7 | II li | vello del mare | 58 |
| | 7.1 | Variazioni del livello del mare a grandi scale spaziali e temporali | 59 |
| | 7.1. | 1 Cambiamento della temperatura dell'oceano | 61 |
| | 7.1. | 2 Contributo delle masse di ghiaccio | 62 |
| | 7.1.3 | 3 Contributo derivante dagli utilizzi delle acque interne | 62 |
| | 7.1. | 4 Importanza dell'impatto antropico | 63 |
| | 7.1. | 5 Previsioni future | 65 |
| 8 | Inq | uadramento territoriale dell'area di studio | 68 |
| | 8.1 | Clima meteomarino | 69 |
| | 8.2 | Caratteristiche del trasporto solido litoraneo | 70 |
| | 8.3 | Morfologia dei fondali | 71 |
| | 8.4 | Sedimentologia | 71 |

| 8 | 3.5 | Evo | oluzione storica della linea di riva e dell'installazione delle opere | 73 |
|----|------|-------|---|--------|
| 9 | Ob | iett | ivi della tesi | 77 |
| 10 | Mo | del | lo numerico | 78 |
| 1 | 0.1 | Ιm | odelli di cambiamento delle linee di costa | 78 |
| | 10.1 | l.1 | Confronto tra i diversi tipi di modelli di cambiamento delle spiagge | 80 |
| 1 | 0.2 | GEI | NESIS: Generalized model for simulating shoreline change | 82 |
| | 10.2 | 2.1 | Storia dello sviluppo di GENESIS | 84 |
| 1 | 0.3 | Ιm | nodelli per il cambiamento della linea di costa come strumento | per il |
| p | roce | sso (| di pianificazione | 87 |
| 1 | 0.4 | Val | utazione dei progetti e uso di GENESIS | 91 |
| | 10.4 | 1.1 | Fase di <i>scoping</i> e fase di disegno | 91 |
| | 10.4 | 1.2 | Dati di input | 91 |
| | 10.4 | 1.3 | Condizioni al contorno | 98 |
| | 10.4 | 1.4 | Variabilità nei processi costieri | 99 |
| 11 | Tec | oria | della modellazione dell'evoluzione della linea di | riva e |
| GE | NES | IS | | 102 |
| 1 | 1.1 | Ass | unzioni di base di un modello di cambiamento della linea di costa | 102 |
| 1 | 1.2 | Equ | uazioni che governano il cambiamento della linea di costa | 103 |
| 1 | 1.3 | Tas | so di trasporto solido | 106 |
| 1 | 1.4 | Par | ametri empirici | 108 |
| 1 | 1.5 | Cal | colo del moto ondoso | 112 |
| 1 | 1.6 | Мо | dello interno di trasformazione delle onde | 114 |
| | 11.6 | 5.1 | Onde al frangimento | 114 |
| | 11.6 | 5.2 | Onde al frangimento influenzate da strutture | 117 |
| | 11.6 | 5.3 | Modifiche del profilo | 119 |
| | 11.6 | 5.4 | Trasmissione delle onde nelle barriere parallele distaccate | 120 |
| | 11.6 | 5.5 | Contorni offshore rappresentativi | 122 |

| 11.7 | Ripid | ità limitante dell'onda in acque alte | 122 |
|-------|--------------|---|-----------------|
| 11.8 | Fines | tre di energia d'onda | 123 |
| 11.9 | Scher | ma di soluzione numerica | 124 |
| 11.9 | 9.1 <i>A</i> | Accuratezza fisica e numerica | 124 |
| 11.10 | Sist | tema della griglia e schema di risoluzione delle equazion | i differenziali |
| con s | oluzion | ii finite | 125 |
| 11. | 10.1 | Griglia sfalsata | 125 |
| 11. | 10.2 | Schema di risoluzione delle equazioni differenziali implicite | con soluzione |
| limi | itata | 126 | |
| 11.11 | Cor | ndizioni dei limiti laterali e vincoli | 127 |
| 11. | 11.1 | Limite laterale pinned beach | 127 |
| 11. | 11.2 | Limite laterale gated | 127 |
| 11. | 11.3 | Movimento del sedimento | 128 |
| 11. | 11.4 | Muri radenti | 129 |
| 11.12 | Rip | ascimenti | 129 |
| 11.13 | Tas | so di trasporto solido <i>longshore</i> : considerazioni pratiche | 130 |
| 11.14 | Des | scrizione dei file di input e di output di GENESIS | 132 |
| 12 Te | oria d | ella modellazione di STWAVE | 134 |
| 12.1 | Assur | nzioni di base del modello | 134 |
| 12.2 | Equa | zioni che disciplinano il modello | 136 |
| 12. | 2.1 F | Rifrazione e shoaling | 138 |
| 12. | 2.2 [| Diffrazione | 139 |
| 12. | 2.3 T | ermini source – sink | 139 |
| 12.3 | Discre | etizzazione numerica | 142 |
| 12.4 | Descr | rizione dei file di input di output | 143 |
| 13 Ap | plicaz | ione del modello numerico | 145 |
| 13.1 | Archi | tettura di CFDAS – Beach | 145 |

| | 13.2 | Impostazioni delle directory e gestione dei dati per l'implementazione de la company d | del |
|----|---------|--|-------------|
| | mode | llo1 | 48 |
| | 13.3 | Step fondamentali per l'impostazione del modello1 | 49 |
| | 13.4 | Creazione del supporto cartografico digitale1 | 51 |
| | 13.5 | Determinazione del dominio spaziale d'interesse1 | 54 |
| | 13.6 | Creazione dell'andamento batimetrico, della griglia di calcolo e della linea | di |
| | riva de | el dominio d'interesse su Nemos1 | .56 |
| | 13.7 | Creazione della griglia di calcolo di GENESIS1 | 60 |
| | 13.8 | Creazione delle condizioni di moto ondoso offshore | .63 |
| | 13.9 | Analisi delle condizioni di moto ondoso offshore | 65 |
| | 13.10 | Creazione dello spettro | .68 |
| | 13.11 | Propagazione del moto ondoso da largo a costa1 | 69 |
| | 13.12 | Simulazione della linea di riva1 | 74 |
| | 13.1 | 12.1 Fase di calibrazione | L 84 |
| | 13.1 | 12.2 Fase di simulazione futura | L 86 |
| | 13.13 | Tips and tricks1 | 86 |
| 14 | 4 Ris | ultati e discussioni1 | 88 |
| 1! | 5 Cor | nclusioni1 | 94 |
| 10 | 5 Bib | oliografia1 | 96 |
| 17 | 7 Rin | ngraziamenti20 | 06 |

1 Le coste

Il litorale marino è quella fascia più o meno larga, al contatto fra la terra ed il mare, che è in parte ed alternativamente emersa o sommersa dalle acque; comprende la linea di riva che ha una posizione temporanea e mutevole, secondo oscillazioni di corta o lunga durata, in conseguenza delle variazioni del livello del mare dovute sia al flusso e al riflusso delle onde, che a quello delle maree e via via fino a quelle delle trasgressioni e regressioni marine.

La zona costiera viene anche definita come "lo spazio dove l'ambiente terrestre influenza quello marino (lacustre) e viceversa."

La costa costituisce una porzione di territorio fortemente antropizzata dove spesso l'uomo ha posto in essere i propri interessi, di natura economica, sociale o puramente ricreativa. Pertanto si è reso necessario acquisire la capacità e le conoscenze per gestire tale territorio, caratterizzato da un'estrema variabilità sia a livello spaziale che temporale.

La geomorfologia di una costa è influenzata dalla sua posizione geografica in relazione a:

- ✓ correnti;
- ✓ clima;
- ✓ moto ondoso;
- ✓ regime di marea;
- ✓ ecologia costiera e marina.

In particolare i fattori che influenzano l'evoluzione della posizione della linea di riva sono il vento, il moto ondoso, le correnti litoranee e l'apporto sedimentario. Questi fattori risultato dominanti o meno a seconda della posizione delle coste e della loro tipologia (Cappietti A.A.2011-2012).

1.1 Tipi di coste e caratteristiche

Non esiste un'unica classificazione delle coste riconosciuta universalmente. Le classificazioni delle coste esistenti sono state effettuate secondo molteplici approcci, che utilizzano criteri diversi:

- la forma (morfologia) della superficie terrestre (sopra o sotto il livello medio del mare);
- il movimento relativo del mare rispetto alla costa e viceversa;
- gli effetti dei processi marini sulla modificazione della costa;
- l'influenza climatica sui processi e sulle forme della costa;
- l'età e la durata dei materiali costieri.

Si riportano di seguito alcuni esempi.

La classificazione più semplice è quella basata sul **criterio morfologico** che suddivide le coste in:

- coste alte, che si elevano sul livello del mare e si trovano su orogeni recenti (origine magmatica o metamorfica). Sono caratterizzate dalla presenza delle pocket beach. A loro volta possono essere suddivise in dure (hardclift), rocciose e resistenti all'erosione e morbide (softclift), composte di materiale poco coerente e farinoso, si modificano facilmente col moto ondoso.
- coste basse, che non si elevano, costituiscono il proseguimento delle terre emerse, non presentano forti variazioni di pendenza. A seconda della loro pendenza per piccole variazioni del livello del mare "coprono o scoprono" grandi estensioni di terre emerse. Sono in corrispondenza di cratogeni (orogenesi in passato con conseguente spianamento), quindi di terre vecchissime. Le coste basse si suddividono in dure (shore platform), che sono evidenziabili dove c'è forte escursione di marea, che arriva a scoprire la piattaforma continentale, e morbide, ovvero le vere e proprie spiagge sabbiose (Cappietti A.A.2011-2012).

Un'altra classificazione si basa su **criteri genetici evolutivi** e quindi sui movimenti relativi costalivello del mare. In questo sistema di classificazione si individuano cinque classi fondamentali:

- coste di sommersione. Si hanno ovunque si verifichi un abbassamento tettonico in prossimità del mare, o dove si verifichi un innalzamento del livello marino, e si viene a formare una nuova linea di riva che si stabilisce in corrispondenza di una nuova "curva di livello" della superficie terrestre. Al di sotto di tali quote tutte le terre che precedentemente emergevano sono ora sommerse dal mare. Le coste di sommersione vengono divise in sottogruppi a seconda dei caratteri del rilievo che è stato sommerso:
 - coste a rias che sono molto irregolari, con insenature. Si sono formate per sommersione in regioni che erano state modellate da corsi d'acqua in valli e dorsali;
 - coste a fiordi che sono caratterizzate dalla ripidità, dalla profondità dell'acqua e dal notevole sviluppo verso l'interno. Si sono formate per sommersione in regioni che erano state scavate dai ghiacciai, che approfondirono i loro solchi anche al di sotto del livello del mare;
- **coste di emersione**. Si hanno ovunque si sia verificato un sollevamento della crosta terrestre in prossimità dei margini continentali, o dove il livello marino si è abbassato;

- coste neutre. Si hanno dove si è formata una costa per recente accumulo di materiale detritico in mare. L'aggettivo neutro indica che non c'è stata alcuna variazione tra il livello del mare e la regione costiera. Esse sono di diversi tipi:
 - o delta;
 - o coste delle pianure alluvionali;
 - o coste delle pianure proglaciali;
 - o coste vulcaniche;
 - o coste delle barriere coralline;
- **coste di faglia**. Sono generate da sistemi di faglie che interessano la crosta terrestre in modo che si verifichi uno sprofondamento della parte di crosta sul lato a mare della frattura ed un corrispondente sollevamento del lato situato verso terra;
- **coste poligeniche**. Si sono formate in seguito alla combinazione di due processi genetici indicati nelle classi precedenti (Strahler 1984).

La classificazione di Shepard integra le classificazioni ad essa precedenti ponendo enfasi all'importanza relativa degli agenti primari (fattori geologici ed in generale non marini) e secondari (processi marini moderni) che le generano. In base a questa classificazione le coste vengono suddivise in primarie e secondarie.

Le coste primarie sono gli ambienti costieri che si sono formati, in tempi geologici anche particolarmente brevi, attraverso l'azione prevalente di agenti diversi da quelli marini. Le coste primarie comprendono le coste di erosione terrestre (rias (valli fluviali sommerse), dendritiche, trellis (fiordi e solchi glaciali sommersi), topografia carsica sommersa), le coste di deposizione subaerea (coste di deposizione fluviale, coste deltaiche, coste deltaiche composite, coste di deposizione glaciale, coste di deposizione eolica, coste da frana), le coste vulcaniche (lavaflow, tephra, collasso o esplosione vulcanica), le coste tettoniche (scarpate di faglia, coste a pieghe, estrusioni sedimentarie (domi)), le coste ghiacciate.

Le coste secondarie sono le coste formatesi per azione prevalente degli agenti marini, sono geologicamente mature. Le coste secondarie comprendono le coste di erosione marina (falesie rettificate dal moto ondoso rese irregolari dall'erosione delle onde), le coste di deposizione marina (coste a barriera, promontori cuspidati, spiagge, piane di fango e barene), le coste biocostruite (barriere coralline, barriere a serpulidi, barriere ad ostriche, coste a mangrovie, coste ad alofite).

1.2 Bilancio sedimentario

Il bilancio sedimentario (Figura 1) è uno strumento che permette di studiare i cambiamenti del volume delle spiagge, stimandone le principali *sources* e *sinks* di sedimento.

I sources includono tutti gli "apporti" da terra e da mare: gli input sedimentari dei fiumi, l'erosione delle scogliere e delle dune del restrospiaggia, i trasporti eolici, i versamenti artificiali ed il trasporto verso la spiaggia sia in direzione parallela che perpendicolare alla riva. I sinks sono rappresentati dagli "asporti" verso terra, verso specchi interni e verso il largo: il trasporto verso terra da parte del vento o da parte di mareggiate che scavalcano la linea delle dune, l'allontanamento al largo dei sedimenti (distribuito o attraverso solcature), i materiali prelevati da cave sul litorale, il trasporto dalla spiaggia sia in direzione parallela che perpendicolare alla riva e l'erosione da vento. Il movimento longitudinale delle sabbie è dovuto alla componente parallela alla riva di moti ondosi che giungono in prossimità delle coste con fronti obliqui. In questi casi singole mareggiate possono muovere centinaia di migliaia di metri cubi di sabbia per chilometro di costa anche lungo i nostri litorali, che pur non sono soggetti ad onde di tipo oceanico. Dato che però questo movimento determina un flusso continuo di sabbia, generalmente la quantità asportata in un settore è bilanciata da pari volumi provenienti da settori limitrofi ed il bilancio netto della spiaggia mantiene il pareggio. Ciò è vero se il litorale è rettilineo e non ci sono ostacoli al flusso di sedimenti. Lo spostamento dei materiali lungo riva non comporta, comunque, una reale perdita di sedimenti dal "sistema spiaggia" poiché essi rimangono in genere all'interno di una determinata unità fisiografica¹, entità di riferimento di questa analisi (Pranzini 1995).

La dispersione verso il largo è generalmente assai modesta, a meno che non siano presenti canyon sottomarini che si spingono in prossimità della riva o che i fondali dei settori rocciosi limitrofi abbiano una forte pendenza. Per muoversi verso il largo i clasti devono venire prima ridotti nelle loro dimensioni dall'abrasione marina, processo relativamente lento che si attua nella fascia compresa tra la linea dei frangenti e la cresta della berma di tempesta, ma più efficacemente in prossimità della battigia (Pranzini 1995).

Ovviamente se nel calcolo del bilancio sedimentario si osserva che gli input sono uguali agli output si ha una spiaggia in condizioni stazionarie, mentre se gli input prevalgono sugli output si ha deposizione di sedimento e accrescimento della spiaggia. Se invece gli output sono maggiori degli input la spiaggia va incontro ad erosione. Sia i *sink* che i *sources* possono essere

costa adiacenti

4

¹ L'unità fisiografica è la porzione di costa che risulta omogenea ed indipendente riguardo ai processi di erosione, trasporto e sedimentazione che avvengono al suo interno. È delimitata da limiti morfologici naturali o artificiali che impediscono o riducono notevolmente lo scambio di sedimenti con i tratti di

notevolmente influenzati dalle attività umane. Molto spesso la voce determinante del bilancio è quella del trasporto longitudinale netto.

È importante sottolineare che un bilancio negativo non comporta la necessità di costruire delle opere di protezione, che potrebbero rivelarsi dannose, ma può essere semplicemente causato dalla scarsa attività idrologica temporanea dei corsi d'acqua, dalla eccezionale energia del mare ed altre cause naturali reversibili (Pranzini 1985).

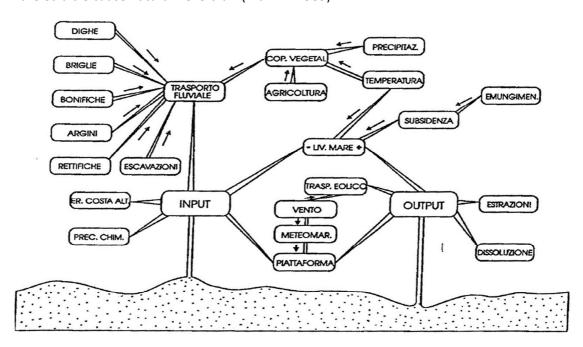


Figura 1 Bilancio sedimentario dei litorali e processi che ne influenzano l'entità. Linee convergenti o divergenti indicano che un determinato fattore tende a fare diminuire o aumentare l'entità di una voce. Le frecce indicano il senso in cui agisce un fattore (Pranzini 1995).

La forma della spiaggia è quindi continuamente soggetta a variazioni, anche molto rapide. Possono variare la forma e la posizione della linea di riva, la pendenza della battigia e del fondale, così come varia il profilo subacqueo. Le variazioni avvengono anche a livello granulometrico.

Se però prendiamo in considerazione tutta la spiaggia, nella sua parte emersa ed in quella sommersa, ci accorgiamo che queste variazioni, sia morfologiche che granulometriche, sono dovute prevalentemente allo spostamento di sabbia da e verso riva e che il volume complessivo dei sedimenti che costituiscono la spiaggia non varia in modo così consistente come i mutamenti della sua morfologia potrebbero fare supporre. In effetti, la spiaggia è soggetta a processi di *feed* – *back* che le fanno assumere la forma che meglio dissipa l'energia del moto ondoso, ed essendo questa variabile da momento a momento, anche la spiaggia si adegua modificandosi. Se ciò è quanto emerge da osservazioni di breve durata, il confronto fra carte rilevate a distanza di anni e di decenni mette in mostra che effettivamente il sistema spiaggia è in genere assai lontano dalle condizioni di equilibrio (Pranzini 1995).

1.3 Cause dell'erosione costiera

La gran parte delle spiagge, in Italia e nel mondo, deve la propria origine e sopravvivenza all'apporto sedimentario dei corsi d'acqua e proprio alle variazioni di input fluviale si devono molte delle oscillazioni della linea di riva avvenute in epoca storica ed in atto tutt'oggi. Vi sono numerosi fattori, naturali ed antropici, che influenzano più o meno direttamente l'input fluviale; alcuni sono facilmente identificabili e la quantificazione dei loro effetti piuttosto semplice, altri sono difficilmente studiabili e di incerto effetto.

Uno di questi fattori è rappresentato dalla variazione del regime pluviometrico, che influenza direttamente i tassi di erosione del suolo e modifica le capacità di trasporto dei fiumi, tanto che un aumento delle precipitazioni dovrebbe dare come risultato un incremento dell'input sedimentario ed una progradazione delle spiagge. Ciò, in linea generale, può essere considerato vero, ma esistono casi in cui l'incremento delle precipitazioni determina un aumento delle copertura vegetale, che, a sua volta, riduce l'erodibilità dei suoli e il ruscellamento superficiale, tanto da portare ad una riduzione dell'input fluviale (Figura 2). Un simile effetto è assai probabile in aree semiaride, dove il tasso di erosione del suolo è elevato, a dispetto delle scarse precipitazioni.

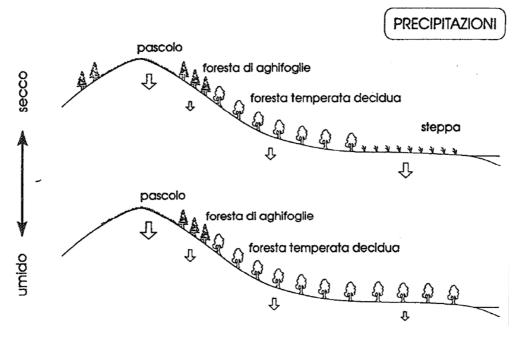


Figura 2 Variazioni pluviometriche dello stesso segno possono determinare sia un incremento che una riduzione del tasso di erosione del suolo (simbolizzato con frecce bianche). Ciò è possibile perché esse condizionano anche il tipo di copertura vegetale (Pranzini 1995)

La copertura vegetale è inoltre influenzata dalla temperatura (Figura 3). Un aumento di questa, in particolare nelle aree mediterranee, può determinare una riduzione della vegetazione con conseguente aumento dell'erodibilità. Questa variazione di temperatura dovrebbe però portare ad uno spostamento verso l'alto del limite della vegetazione arborea, con conseguente

riduzione del tasso di erodibilità nelle parti montane dei bacini idrografici dove, a causa della maggiore energia del rilievo, la produzione di sedimenti è maggiore. Tale fenomeno è difficilmente studiabile ed apprezzabile perché risulta offuscato dalle variazioni di copertura vegetale indotte dall'intervento antropico (Pranzini 1995).

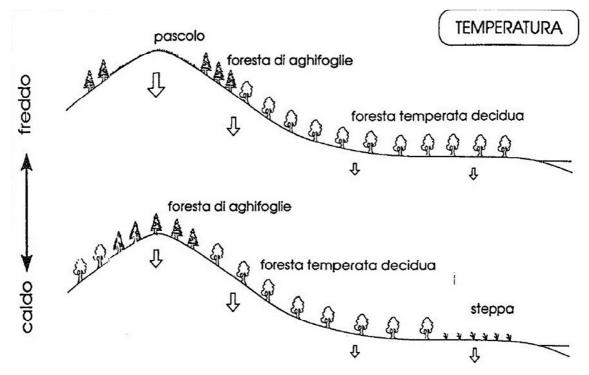


Figura 3 Variazioni termometriche dello stesso segno possono determinare sia un incremento che una riduzione del tasso di erosione del suolo (simbolizzato con frecce bianche). Ciò è possibile perché esse spostano in senso altitudinale le fasce di vegetazione (Pranzini 1995).

Pur in quadri regionali differenziati, relativi alle diverse fasi demografiche, economiche e culturali che ha attraversato il territorio italiano, è possibile riconoscere un progressivo uso del territorio tendente ad un aumento dell'erodibilità dei suoli.

La storia della copertura vegetale in Italia vede l'inizio della ricrescita del bosco e della macchia già nella seconda metà dell'800, cui fa seguito, in questo secolo, un processo ancora più rapido dovuto sia all'abbandono delle aree montane e collinari, conseguente al flusso migratorio verso le città e le fasce costiere, che all'opera di rimboschimento, resasi necessaria per arrestare l'erosione del suolo e per ridurre il rischio di alluvioni.

Questa ricrescita del bosco può essere in parte la causa dell'erosione delle spiagge italiane, dovuta quindi non tanto alla responsabilità dell'uomo di oggi, quanto ad un ritorno verso condizioni più naturali. Guardando indietro a come è stato "amministrato" il territorio negli ultimi tremila anni non potremmo che affermare che la messa a coltura di vaste superfici ha portato ad una erosione accelerata del suolo ed ad un dissesto idrogeologico di imponenti proporzioni. I prodotti di questo dissesto costituiscono buona parte di quelle spiagge la cui erosione sarebbe la diretta conseguenza di una saggia politica territoriale.

Tra gli interventi effettuati sul territorio, non sono solo i disboscamenti a fare aumentare l'input fluviale, anche le arginature e le rettifiche dei corsi d'acqua hanno un effetto simile.

Il taglio dei meandri (Figura 4) impone al fiume un percorso più breve e quindi con maggiore pendenza, favorendo il trasporto di sedimenti verso il mare. Questa pratica è stata attuata, nei

secoli passati, in particolare in prossimità di centri abitati.

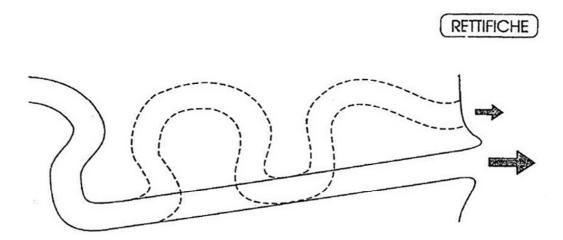


Figura 4 La rettifica delle anse fluviali determina un incremento dell'input fluviale (simbolizzato con frecce grigie) (Pranzini 1995)

Gli argini artificiali vengono costruiti allo scopo di contenere nell'alveo fluviale maggiori portate, riducendo le possibilità di esondazione. Il sovralluvionamento delle pianure viene così ostacolato e la gran parte dei materiali che prima ne innalzava il livello finisce direttamente in mare. Tali interventi vengono attuati tutte le volte che viene effettuata una deviazione fluviale, come nel caso dei meandri, per "imporre" al fiume un determinato tracciato che il corso d'acqua tenderebbe ad abbandonare per seguirne uno con andamento simile a quello primitivo. Sebbene i risultati di questa lotta contro le alluvioni vengano considerati ancora deludenti, l'incremento dei materiali trasportati a mare è stato certamente notevole.

Non tutti gli interventi antropici effettuati sulle aste fluviali hanno comportato un aumento dell'input sedimentario: la costruzione di "diversivi" per immettere le "torbide" nelle casse di colmata delle bonifiche e quella delle briglie e delle dighe lungo le aste fluviali hanno determinato spesso una drastica riduzione della quantità di sedimenti trasportati al mare.

Le bonifiche per colmata (Figura 5) hanno caratterizzato gli interventi sul territorio negli ultimi secoli, con un periodo di esasperata determinazione tra l''800 ed i primi del '900. Sotto la spinta della necessità di nuove aree da mettere a coltura e di quella di sconfiggere la malaria, per più di un secolo in molte regioni è stata condotta una vera a propria guerra con contro le aree palustri che ha avuto come prima conseguenza l'inizio dell'erosione delle spiagge italiane.

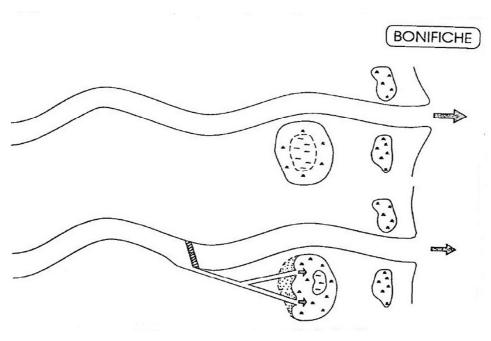


Figura 5 Le deviazioni fluviali operate nell'ambito di bonifiche per colmata riducono l'input fluviale (simboleggiato con frecce grigie) (Pranzini 1995)

L'effetto esercitato dalle briglie (Figura 6) costruite sulle aste fluviali nelle parti alte dei bacini non è facilmente calcolabile, dato che non è certamente proporzionale all'esiguità dei sedimenti che esse intrappolano nei primi periodi successivi all'edificazione, ma la loro grande diffusione ha certamente contribuito a ridurre l'approfondimento degli alvei dal quale traggono origine molti dei processi di erosione del suolo in aree montane e collinari. Inoltre esse riducono la capacità di trasporto intrappolando i sedimenti e diminuendo la pendenza del letto fluviale, con conseguente diminuzione della velocità del fiume.

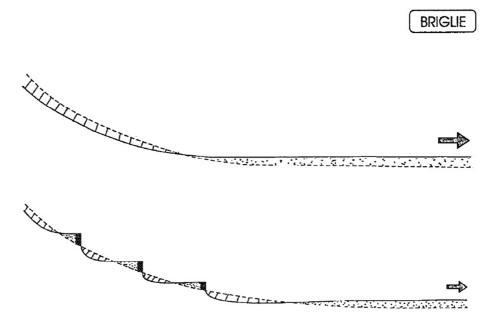


Figura 6 La costruzione di briglie nella parte alta dei bacini idrografici si riflette in una riduzione dell'input fluviale (simbolizzato con frecce grigie) (Pranzini 1995)

Più facile sembrerebbe la valutazione dell'effetto delle dighe (Figura 7) sull'input sedimentario, poiché si può ipotizzare che tutta la produzione di sedimenti dal bacino da esse sotteso venga effettivamente persa dal litorale, dato che solo le frazioni granulometriche più fini possono uscire in sospensione dall'invaso, quelle che non costituiscono un efficace alimentazione delle spiagge. Anche in questo caso le cose sono però assai complesse, poiché a valle della diga le capacità erosive del fiume divengono maggiori e quindi la perdita effettiva deve essere ridotta. Quando però l'acqua viene portata a valle con una rete idraulica artificiale la portata liquida diminuisce e le capacità erosive e di trasporto non possono aumentare di molto.

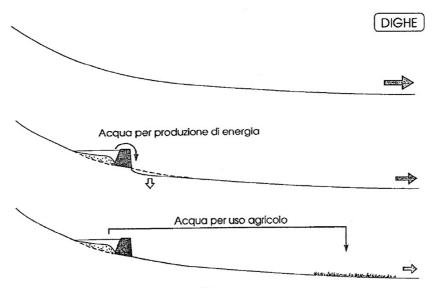


Figura 7 La costruzione di dighe si riflette in una direzione dell'input fluviale (simbolizzato con frecce grigie) (Pranzini 1995).

Anche il prelievo di acqua direttamente dalle falde idriche delle pianure da coltivare innesca, comunque, una serie di processi che tendono all'erosione dei litorali, dato che favorisce la subsidenza (Figura 8) e quindi il tasso di sedimentazione fluviale.

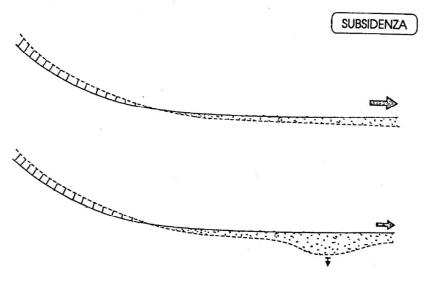


Figura 8 La subsidenza delle pianure, accelerata spesso dall'estrazione di acqua ed idrocarburi, si riflette in una riduzione dell'input fluviale (simbolizzato con frecce grigie) (Pranzini 1995)

L'ultimo tra gli interventi più drastici effettuati sui corsi d'acqua ed ai quali è da attribuire una delle principali responsabilità dell'erosione dei litorali è l'estrazione di inerti dall'alveo (Figura 9). Questa attività condotta in modo occasionale e con modesti mezzi fino al secolo scorso, è diventata negli anni '60 una vera e propria "industria" sulla spinta della richiesta di materiali da costruzione per gli edifici e per le vie di comunicazione. Dagli alvei fluviali sono stati tolti ogni anno materiali per volumi di gran lunga superiori alla portata di fondo dei fiumi stessi, tanto che il loro livello è stato abbassato di svariati metri, cosa che ha innescato gravi problemi di instabilità nelle sponde e nei ponti. Questa operazione è stata anche favorita dalla lotta contro le alluvioni, dato che l'allargamento e l'approfondimento dell'alveo comportano un aumento della sezione idraulica. I danni da questa attività sono tali che, anche dove l'estrazione è stata vietata da più di 20 anni, la morfologia dei fiumi non ha ancora assunto la configurazione naturale e profonde buche sono ancora evidenti nei loro profili longitudinali e trasversali.

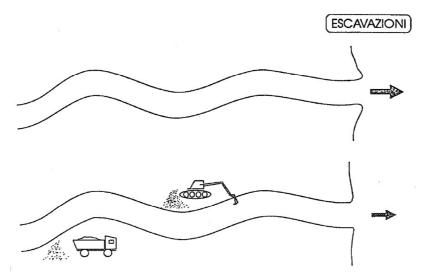


Figura 9 L'estrazione di inerti dagli alvei fluviali si riflette in una riduzione dell'input fluviale (simboleggiato con frecce grigie). Questa è una delle cause principali dell'erosione in atto lungo i nostri litorali (Pranzini 1995)

Complessivamente, è possibile affermare che l'effetto di tutti gli interventi realizzati in questo secolo all'interno dei bacini idrografici è quello di una drastica riduzione dell'input fluviale che, in un momento di innalzamento del livello marino, rende il cosiddetto "equilibrio" dei litorali assai precario.

Oltre agli interventi antropici a livello fluviale sono anche stati determinanti gli interventi diretti sul litorale. Infatti bisogna tenere ben presente che la spiaggia in assenza di una sufficiente alimentazione detritica, risponde con semplici arretramenti del fronte litoraneo che permettono di ottenere, grazie all'articolazione della costa, la stabilità su fronti più arretrati. La natura tuttavia ha disposto anche un meccanismo estremamente ingegnoso per assorbire senza gravi arretramenti, eventi meteomarini di carattere eccezionale. In queste evenienze la

protezione del litorale è affidata al manto di coltre detritica costituito dal complesso spiaggia sommersa, spiaggia emersa e duna.

In occasione delle grandi mareggiate invernali, quando il mare attacca la spiaggia con onde di forte intensità e ripidità avviene un trasferimento del sedimento della spiaggia ai fondali antistanti con conseguente arretramento della linea di riva. In questo modo la spiaggia pone in essere un meccanismo di difesa che le consente di assorbire l'energia incidente su di una fascia di maggiore profondità spostando verso il largo la linea dei frangenti. Questo particolare assetto della spiaggia, detto assetto invernale, non è però definitivo.

Non appena la ripidità del moto ondoso diminuisce con l'avvento della stagione migliore, la spiaggia ritorna all'assetto estivo, a meno che nel frattempo non sia stato realizzato un intervento di difesa del litorale.

Come la spiaggia sommersa e la berma emersa sono la prima linea di difesa per assorbire l'energia del moto ondoso incidente, così la duna costituisce in natura una riserva di materiale detritico da porre in circolo in casi di particolare vivacità delle agitazioni marine allo scopo di evitare forti arretramenti.

Durante i periodi di bonaccia, od in mancanza di eventi eccezionali, la duna erosa si ricostituisce naturalmente per fornire un'efficace difesa in occasione di future forti mareggiate.

Il meccanismo di difesa naturale è ovviamente reso possibile dal concorso delle azioni marine, del vento e del manto di copertura vegetale.

La continua pressione urbanistica sulle zone litoranee ha ormai quasi ovunque, nei Paesi industrializzati, manomesso questo efficace meccanismo di difesa: grandi estensioni di dune sono state livellate e pavimentate per la costruzione di opere di viabilità o peggio di urbanizzazione del litorale. Dove manca la duna non sono possibili le normali oscillazioni delle spiagge e si va incontro a fenomeni di cambiamento del tipo di equilibrio che in molti casi possono essere irreversibili (Pranzini 1985).

Se si considera che solo all'inizio dell'800 tutte le spiagge italiane erano in progradazione si comprende l'importanza assunta dall'uomo quale agente geomorfologico sulle coste (Pranzini 1995)

2 Il moto ondoso

2.1 Definizioni e generalità

Le onde marine sono fluttuazioni del livello dell'acqua, accompagnate da correnti locali, accelerazioni e fluttuazioni della pressione. La loro forma più semplice è quella sinusoidale. Si forniscono le seguenti definizioni (Figura 11):

- cresta: punto di massima sopraelevazione. Si misura in m;
- cavo: punto di massima depressione. Si misura in m;
- altezza d'onda (H): distanza verticale esistente tra la cresta ed il cavo. Si misura in m;
- **lunghezza d'onda (L)**: distanza orizzontale esistente tra la cresta di un'onda e la cresta di quella successiva. Si misura in m;
- **periodo** (**T**): tempo che intercorre tra il ripresentarsi di un momento caratteristico del fenomeno (ad es. la cresta dell'onda). Si misura in sec;
- frequenza (f): reciproco del periodo. Rappresenta il numero di volte nell'unità di tempo (secondo) con cui si presenta un momento caratteristico del fenomeno (ad es. la cresta dell'onda). Si misura in Hz;
- **celerità** (c): velocità dell'onda, è data dal rapporto tra la lunghezza d'onda ed il periodo. Si misura in m/sec;
- ampiezza (a): distanza tra un cavo (o una cresta) ed il livello di mare in quiete. Se l'onda è regolare essa è pari alla metà dell'altezza d'onda. Si misura in m;
- onda di moto ondoso: parte di moto ondoso compresa tra due attraversamenti del livello del mare in quiete
- variabile η: spostamento della superficie libera del mare durante il moto ondo rispetto al livello di quiete in funzione del tempo.
- raggio d'onda: direzione ortogonale all'allineamento delle creste delle onde. La direzione del raggio d'onda è la direzione di propagazione dell'onda. Vi sono differenti convenzioni per definirne la direzione (Figura 10). Quella generalmente utilizzata, considerata anche in questo elaborato, è la convenzione metereologica. Essa considera la direzione dell'onda come l'angolo misurato in senso orario tra la direzione del nord geografico ed il vettore di provenienza.

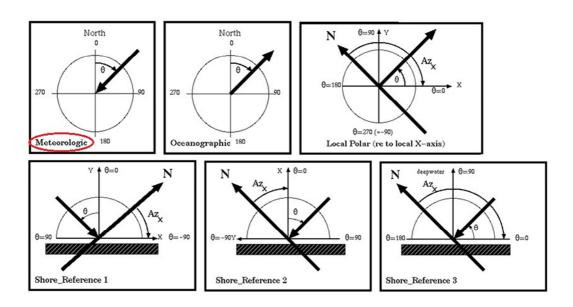


Figura 10 Convenzioni per la definizione della direzione del moto ondoso

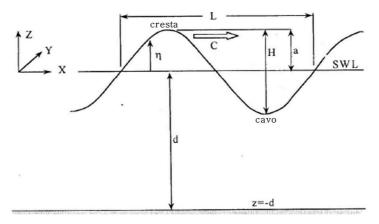


Figura 11 Nomenclatura di base delle onde (Kamphuis 2000)

La formazione del moto ondoso è causata principalmente da tre fattori:

- ✓ vento;
- ✓ terremoti;
- √ forza di attrazione gravitazionale (Cappietti, Appunti dalle lezioni di Protezione dei Litorali A.A.2011-2012).

2.2 Tipologie di onde

Le onde possono essere classificate in base all'ordine di grandezza del periodo (Figura 12):

- Capillary waves. Sono le onde più corte, sono generate dal vento. Hanno un periodo
 inferiore ad un decimo di secondo. Si osservano quando il mare è "piatto", quando il
 vento che soffia è appena percettibile, e crea queste onde piccolissime (Pinet 2009).
- Wind waves. Sono le cosiddette "onde di mare vivo", si osservano quando localmente agisce sempre il vento. Sono le più irregolari ed hanno periodi che arrivano a circa 15

- secondi. In inglese vengono definite anche semplicemente come "sea". Si propagano più o meno nella stessa direzione del vento.
- **Swell**. In italiano vengono definite "onde di mare morto". Sono ciò che rimane delle onde da vento dopo che hanno percorso molte centinaia di km ed il vento è cessato. Durante il loro percorso le onde non sono più sostenute dal vento, che è il loro motore, e le onde più piccole cedono la loro energia alle onde più lunghe. Pertanto si hanno periodi maggiori delle *wind waves*, da 15 a più di 30 secondi, e sono onde piuttosto regolari, in cui i raggruppamenti tra onde sono maggiormente evidenti. Sono caratteristiche dell'ambiente oceanico, piuttosto che di quello Mediterraneo, a causa delle lunghe distanze che sono necessarie per la loro formazione.
- **Seiche**. Vengono definite onde di sessa, le onde che si generano quando si hanno dei bacini allungati nei quali il vento (o la differenza di pressione atmosferica) provoca un accumulo di acqua su un versante. Quando il vento cessa, l'acqua si muove verso il versante opposto dove subisce riflessione e torna indietro, in questo modo si generano delle onde con periodi che vanno da 30 secondi a circa 5 minuti.
- Tsunami. Sono le onde generate da fenomeni episodici, impulsivi ed istantanei che cessano dopo alcuni secondi e provocano uno spostamento improvviso di grandi masse di acqua, scatenando il moto ondoso. Le cause di uno tsunami possono essere terremoti, frane sottomarine, eruzioni vulcaniche sottomarine o impatti meteorici. Le onde di tsunami hanno delle caratteristiche peculiari: hanno una testa ed una coda formate da piccole onde, mentre il corpo centrale è formato da onde molto lunghe, che arrivano alle centinaia di metri. Il periodo varia tra pochi minuti e qualche ora. Si arriva ad avere un totale massimo di 15 onde. È un fenomeno che si propaga per inerzia.
- Tide. Sono le onde di marea, si generano a causa dell'attrazione gravitazionale tra la Luna, la Terra ed il Sole. Il periodo è circa di 12 ore. Nel Mar Mediterraneo la marea è limitata anche a causa dello scarso collegamento con l'oceano, che limita la massa d'acqua complessiva investita dal fenomeno (Wikipedia 2012).

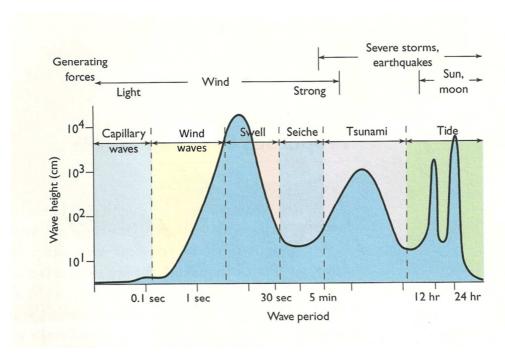


Figura 12 Classificazione delle onde in base al periodo ed all'altezza d'onda (modificata da Pinet 2009)

2.3 Strumenti ondametrici

Gli ondametri sono degli strumenti per la misura locale del moto ondoso, grazie ai quali è possibile registrare i dati riguardanti le onde, necessari per la progettazione di opere costiere (porti, opere di protezione, ripascimenti, ecc.), per lo studio dell'erosione delle coste, delle calamità naturali, per la validazione dei modelli per la previsione del moto ondoso, per aumentare la sicurezza della navigazione e, più in generale, per la comprensione dei fenomeni bio-fisici dell'ambiente marino e dell'atmosfera (ISPRA s.d.)

In passato per determinare l'altezza delle onde venivano effettuate delle stime visive, rispetto a dei punti di riferimento sulla terra ferma o sullo scafo delle navi. Furono istituite delle scale empiriche che collegavano la velocità del vento allo stato del mare, la più conosciuta tra esse è la scala Beaufort riportata in Tabella 1. Nel 1805 l'ammiraglio britannico Francis Beaufort (1774 - 1857) formulò tale scala contenente dei criteri relativamente precisi per quantificare il vento in mare e permettere in tal modo la diffusione di informazioni affidabili e universalmente comprese sulle condizioni di navigazione, sulla base delle precedenti teorie di Alexander Dalrymple. Questo sistema di valutazione ha validità internazionale dal 1 gennaio 1949 (Roth 1978).

| Forza | Denominazione | Nodi | Km/h | m/sec. | Stato del Mare | Alt. Max onde mt. |
|-------|----------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------------|
| 0 | Calma | < 1 | <1 | 0 – 0,2 | Calmo | 0 |
| 1 | Bava di Vento | 1-3 | 1-5 | 0,3-1,5 | | |
| 2 | Brezza Leggera | 4-6 | 6-11 | 1,6-3,3 | Quasi calmo | 0,2 |
| 3 | Brezza Tesa | 7-10 | 12-19 | 3,4-5,4 | | |
| 4 | Vento Moderato | 11-16 | 20-28 | 5,5-7,9 | Poco mosso | 0,5 |
| 5 | Vento Teso | 17-21 | 29-38 | 8,0-10,7 | Mosso | 1,25 |
| 6 | Vento Fresco | 22-27 | 39-49 | 10,8- 13,8 | | 2,0 |
| 7 | Vento Forte | 28-33 | 50-61 | 13,9- 17,1 | Molto mosso | 2,5 |
| 8 | Burrasca | 34-40 | 62-74 | 17,2- 20,7 | Agitato | 4 |
| 9 | Burrasca Forte | 41-47 | 75-88 | 20,8- 24,4 | Molto agitato | 6 |
| 10 | Tempesta | 48-55 | 89-102 | 24,5- 28,4 | Grosso | 9 |
| 11 | Tempesta Violenta | 56-63 | 103-117 | 28,5- 32,6 | Molto grosso | 14 |
| 12 | Tempesta Suprema | 64 ed oltre | 118 ed oltre | 32,7 ed oltre | Tempestoso | 14 ed oltre |

Tabella 1 Scala di Beaufort

Gli ondametri utilizzano diversi principi (Figura 13):

- La misura della pressione idrostatica di una colonna d'acqua che oscilla verticalmente.
 In questo caso vengono impiegati manometri meccanici tipo Bourdon o elettronici, sistemati sul fondo marino, anche a diverse centinaia di metri, in grado di misurare la frequenza e le dimensioni di un'onda che passa sopra lo strumento.
- La misura dell'accelerazione procurata da un'onda su boe ancorate (boe ondametriche). Questi accelerometri misurano il moto ondoso, ma non quello mareale, in quanto quest'ultimo produce accelerazioni estremamente piccole.
- Rilevamento di ultrasuoni emessi e registrati dal fondo marino dove viene sistemato lo strumento. Il registratore riceve gli ultrasuoni emessi verso l'alto e riflessi dalla superficie del mare misurando, in pratica, la variazione del livello dovuta al passaggio di un'onda.
- 4. Rilevamento satellitare. Il radar altimetrico viene installato su un satellite dal quale emette impulsi verso la superficie del mare. Gli impulsi riflessi vengono captati da un sensore che registra la differenza di segnale tra la cresta ed il cavo dell'onda. Strumenti

che seguono principi analoghi possono essere installati anche su aerei (Cognetti, Sarà e Magazzù 2008).

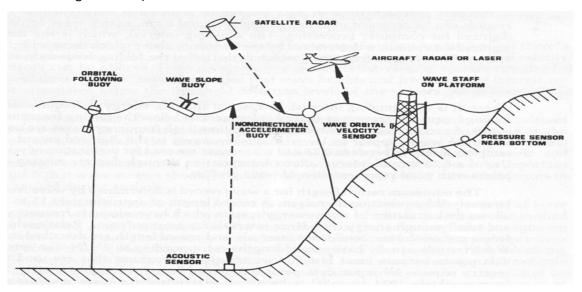


Figura 13 Tipologie strumenti ondametrici (Cappietti, Appunti dalle lezioni di Protezione dei Litorali A.A.2011-2012)

2.4 Rete ondametrica in Italia

La Rete Ondametrica Nazionale (RON), illustrata in Figura 14 è attiva dal luglio 1989. La RON originaria era composta da otto boe direzionali di tipo *pitch-roll*, dislocate al largo di La Spezia, Alghero, Ortona, Ponza, Monopoli, Crotone, Catania e Mazara. Ogni boa, ancorata su fondali di profondità dell'ordine di 100 metri, segue il movimento della superficie dell'acqua e permette di determinare l'altezza e la direzione delle onde. Gli strumenti sono dotati di un sistema di localizzazione che utilizza il satellite ARGOS per il controllo continuo della posizione.

Nel 1999 sono state aggiunte alla rete preesistente le ulteriori boe a traslazione di Cetraro ed Ancona ed è stata sostituita con una ulteriore boa a traslazione: la boa *pitch-roll* di Catania. La Rete Ondametrica Nazionale è quindi configurata ora su dieci stazioni di misura, di cui sette costituite da una boa direzionale *Datawell-Wavec* di tipo *pitch-roll* e tre costituite da una boa direzionale *Datawell-Waverider* di tipo a traslazione. Le stazioni sono completate da un centro di ricezione ed elaborazione a terra dei dati inviati via radio dalla boa. La boa *Datawell-Wavec* segue il movimento della superficie del mare e mediante il sensore *Hippy* 120 ne misura l'elevazione e le inclinazioni riferite ad una piattaforma inerziale, contenuta all'interno del sensore, che individua il piano di riferimento orizzontale. Per le boe *Wavec* l'elevazione è ottenuta dalla doppia integrazione dell'accelerazione verticale misurata da un accelerometro montato sulla piattaforma. Le inclinazioni sono ottenute dalla misura del seno degli angoli formati tra gli assi x e y del sistema di riferimento solidale con la boa ed il piano di riferimento orizzontale. Un sistema di bussole misura le componenti del campo magnetico lungo gli assi

del sistema di riferimento solidale con la boa: Hx, Hy, Hz. Da tali componenti del campo magnetico e dalle suddette inclinazioni si ricavano: il valore assoluto e l'inclinazione del campo magnetico terrestre, l'orientamento della boa e le due pendenze locali della superficie dell'acqua nelle due direzioni N - S ed E - O, che consentono di definire la direzione di propagazione delle onde.

La boa Datawell-Waverider misura il moto ondoso mediante il sensore Hippy 40. Una bussola inerziale misura le componenti del campo magnetico Hx e Hy lungo gli assi x, y e z del sistema di riferimento solidale con la boa. In tal modo la posizione della boa rispetto al sistema fisso di coordinate N, O e verticale è completamente determinato. L'elevazione è ottenuta dalla doppia integrazione dell'accelerazione verticale misurata da un accelerometro montato su una piattaforma stabilizzata. Dalle accelerazioni misurate per mezzo di altri due accelerometri lungo le direzioni x e y solidali con il riferimento mobile della boa, vengono calcolate le accelerazioni lungo gli assi fissi orizzontali nord ed ovest. Le tre accelerazioni sono poi sottoposte a doppia integrazione fino ad ottenere i corrispondenti spostamenti. I valori misurati: elevazione, inclinazioni, Hx, Hy, Hz per le boe tipo pitch-roll ed elevazione e spostamenti in direzione N e O per le boe a traslazione, sono trasmessi, via radio, in continuo dalla boa e vengono ricevuti nella stazione a terra, DIREC. Il ricevitore fornisce i segnali ricevuti dalla boa in un formato codificato ed un apposito computer li decodifica, esegue il controllo sulla qualità dei dati e li pre elabora. I dati vengono acquisiti normalmente per periodi di 30 minuti ogni tre ore e con intervalli inferiori nel caso di mareggiate particolarmente significative. Dalle tre serie temporali di elevazione, pendenza N - S e pendenza E - O per le boe Datawell-Wavec e di elevazione, spostamento N e spostamento O per le boe Datawell-Waverider, vengono ottenuti i seguenti parametri sintetici:

- H_s (metri) altezza d'onda significativa spettrale;
- T_p (secondi) periodo di picco;
- T_m (secondi) periodo medio;
- θ_m (gradi N) direzione media di propagazione.

Inoltre si ottengono i seguenti parametri spettrali per banda di frequenza:

- densità di energia;
- direzione media di propagazione;
- dispersione direzionale (spreading);
- asimmetria (skewness);
- curtosi.

Nei casi di mareggiate particolarmente significative, con valori di H_s superiori a 3.0 m per Ancona, Pescara, Monopoli, Crotone e Catania, 4.5 m per La Spezia, Ponza, Cetraro e Mazara

del Vallo e 5.0 m per Alghero, l'acquisizione dei dati avviene automaticamente in continuo e i dati sono prodotti ogni mezz'ora. Nella stazione a terra, al ricevitore sono collegati due calcolatori mediante i quali si acquisiscono i dati grezzi trasmessi dalla boa e i dati elaborati, e si trasmettono sintesi dei dati al Centro di controllo e gestione della rete presso la Direzione del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. I dati così acquisiti vengono organizzati in file resi disponibili tramite connessioni ISDN al centro di controllo di Roma. Presso quest'ultimo un apposito programma li acquisisce ad intervalli di tempo programmabili e, una volta effettuate ulteriori analisi, popola un *Data Base - Procedure* utente ed altri programmi *Client*, come i modelli matematici, interrogando opportunamente il *Data Base*, producono le rappresentazioni e gli elaborati richiesti.

All'inizio del 2002 sono iniziate le attività di potenziamento della RON, volte alla realizzazione di un sistema affidabile di monitoraggio e diffusione dei dati in tempo reale. Dal punto di vista dei parametri osservati non ci saranno variazioni rispetto alle grandezze misurate dal 1989, tranne per l'aggiunta delle elaborazioni nel dominio del tempo (analisi zero-crossing).

Il funzionamento ininterrotto della rete ormai da più di dieci anni, con un rendimento complessivo superiore al 92% in termini di dati archiviati, permette di avere a disposizione una gran quantità di dati validi per elaborazioni scientifiche ed ingegneristiche.

Presso l'area marittima dell'APAT, è operativo il Centro di Elaborazione e Archiviazione Dati , che svolge il servizio di supervisione dello stato della rete, acquisizione di dati sintetici in tempo reale, archiviazione ed elaborazione dei dati storici. Tali attività consistono in particolare nella verifica continua della completa funzionalità dei dispositivi; nell'acquisizione di dati sintetici in tempo reale; nell'archiviazione, elaborazione e distribuzione dei dati. L'area marittima cura direttamente l'elaborazione e produzione dei Bollettini delle Rilevazioni Ondametriche. In queste pubblicazioni trimestrali vengono riportati: il funzionamento dei sistemi di rilevamento; i tabulati dei dati elaborati: altezza significativa, periodo di picco e direzione media; le elaborazioni grafiche delle serie temporali delle altezze significative; le elaborazioni grafiche delle analisi spettrali (quando le altezze significative hanno valori superiori alla soglia prefissata per ogni stazione).

Dalla fine del 1997 vengono fornite, su richiesta, dati anche in tempo reale ed elaborazioni statistiche e climatologiche per tutto il periodo disponibile.

Le boe sono ormeggiate in posizioni fisse riportate sulle carte nautiche in aree interdette alla pesca ed alla navigazione tipicamente con raggio di circa 250 metri. Ciascuna boa (*Axys Watchkeeper*) ha un diametro di 1.7 metri ed un'altezza sulla linea di galleggiamento di 2.8 metri. E' equipaggiata con un ondametro direzionale accelerometrico a stato solido, di altissima precisione, *TRIAXYS*, di una stazione meteorologica completa e, in alcuni casi anche di

un misuratore della conducibilità elettrica dell'acqua di superficie. Un termometro per la temperature del mare in superficie completa la dotazione standard. Le boe sono dotate di un *corner reflector* che le rende visibili al Radar e sono equipaggiate con una lampada color ambra (ISPRA s.d.).

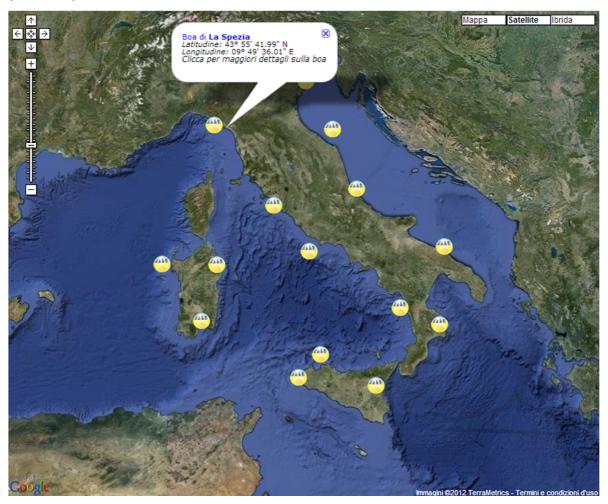


Figura 14 Rete Ondametrica Nazionale. In evidenza i dati della boa ondametrica di la Spezia (ISPRA s.d.)

2.4.1 Boa ondametrica di La Spezia e disponibilità di dati

I dati che sono stati utilizzati per il modello oggetto della presente tesi provengono dalla boa di La Spezia (Figura 15). I dati utilizzati sono stati richiesti in forma grezza, senza nessuna rielaborazione statistica, perché l'elaborazione necessaria è stata svolta dai dei software appositi, come verrà illustrato nel capitolo 12. Tali dati si presentavano sotto forma di un elenco in tre colonne in cui sono riportati l'altezza d'onda, il periodo e la direzione delle onde per l'intervallo temporale indicato. I dati erano rilevati a 3 ore di distanza l'uno dall'altro.

La boa ondametrica di La Spezia ha posizione nominale 43°55′41.99″ N, 9°49′36.01″. È stata tra le prime boe ondametriche della RON ad essere installata, infatti i suoi dati sono disponibili a partire dal 1 luglio 1989.

La boa è del tipo *DATAWELL Directional wavec MKI* ed è collocata in punto con 90 m di profondità.



Figura 15 Fotografia della boa ondametrica di La Spezia (ISPRA s.d.)

3 Descrizione quantitativa del moto ondoso

Il moto ondoso viene caratterizzato da alcune grandezze fondamentali, le cui definizioni sono state fornite nel capitolo 2. In questo capitolo viene descritto come questi dati vengono trattati dal punto di vista statistico.

In passato, la misurazione dei parametri caratteristici del moto ondoso veniva effettuata a vista, per confronto con grandezze note, come le tacche sulla fiancata di una nave. Per anni le misure fatte dai marinai sulle navi in transito sono state l'unica fonte di dati disponibile ai progettisti per caratterizzare il moto ondoso di un dato sito. La misura a vista è però poco accurata, trattandosi di un'analisi soggettiva, in cui l'osservatore deve concentrare la propria attenzione sulle onde più alte presenti nel capo. Fino agli anni '90 l'istituto KNMI (*Koninklijk Nederlands Meteorologish Institut*) ha raccolto e distribuito queste tipologie di dati (Cappietti A.A.2011-2012). L'altezza d'onda ed il periodo che si ottenevano da tale acquisizione venivano detti "altezza d'onda e periodo significativi stimati a vista", indicati rispettivamente come H_v e T_v. Oggi si utilizzano le misurazioni di moto ondoso rilevate dagli strumenti ondametrici, esse si presentano come in Figura 16.

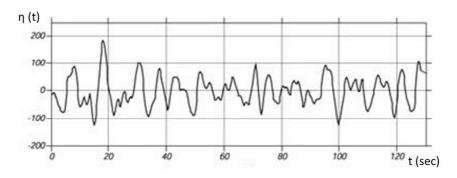


Figura 16 Registrazione di moto ondoso (Stewart 2007)

3.1 Analisi statistica a breve termine

L'analisi a breve termine si riferisce allo studio di eventi di moto ondoso che si limitano ad analizzare un breve periodo temporale (solitamente 15-30 minuti). Viene considerato questo arco temporale perché il fenomeno del moto ondoso in questo intervallo ha caratteristiche sostanzialmente stazionarie dal punto di vista statistico. Le operazioni statistiche, considerando intervalli più ampi, annullerebbero la variabilità del fenomeno e darebbero risultati sempre simili; tuttavia non deve essere nemmeno considerato un intervallo troppo ristretto perché perderebbe credibilità statistica. 15-30 minuti è l'unità di tempo ritenuta

adeguata secondo i criteri messi in evidenza, pertanto è l'intervallo temporale su cui viene eseguita l'analisi, ma ovviamente essa viene ripetuta costantemente nel tempo.

Esistono due diversi tipi di analisi statistiche a breve termine: l'analisi zero-crossing e l'analisi spettrale (Cappietti A.A.2011-2012).

3.1.1 Analisi zero crossing o nel dominio del tempo

Una registrazione di moto ondoso si presenta come in Figura 17, dove si osserva l'andamento della funzione η, ovvero dell'elevazione della superficie del mare nel tempo. Un'onda è definita come la porzione della funzione compresa tra due successivi attraversamenti dello SWL (zero) nella stessa direzione. Quando lo SWL viene attraversato passando da valori negativi a valori positivi si parla di punti *upcrossing*, viceversa, se si passa da valori positivi a valori negativi si hanno punti *downcrossing*. Considerare i *downcrossing* o gli *upcrossing* è indifferente, perché le caratteristiche statistiche sono simmetriche, purché si utilizzi sempre lo stesso criterio per tutta la durata dell'analisi.

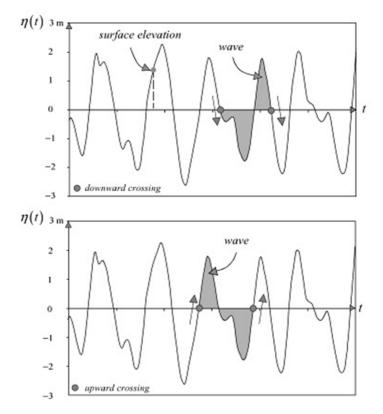


Figura 17 Definizione di un'onda in una registrazione dell'elevazione della superficie del mare con i punti downcrossing (in alto) e upcrossing (in basso) (Holthuijsen 2007)

Una volta che sono state individuate le onde all'interno della registrazione, nel periodo temporale di riferimento, si rilevano i periodi e le altezze d'onda di ciascuna di esse. A questo punto si possono definire le grandezze statistiche fondamentali.

In una registrazione con N onde l'altezza d'onda media H_m è definita dall'Equazione 1.

$$H_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} H_i$$

Equazione 1 Altezza d'onda media

La radice quadratica media (root - mean - square) dell'altezza d'onda H_{rms} è definita dall'Equazione 2.

$$H_{rms} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} H_i^{2}\right)^{1/2}$$

Equazione 2 Radice quadratica media dell'altezza d'onda

Questo valore è rilevante per i progetti relativi all'energia dell'onda perché l'energia d'onda è proporzionale al quadrato dell'altezza d'onda.

Tuttavia le grandezze descritte, per quanto semplici, non sono utilizzate molto spesso, perché sono molto differenti rispetto al valore dell'altezza d'onda significativa stimata a vista, che è tradizionalmente utilizzata.

Per tale motivo, si usa frequentemente il valore dell'altezza significativa $H_{1/3}$ che viene definita come la media delle altezze di un terzo delle onde più alte registrate, come indicato dall'Equazione 3.

$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j$$

Equazione 3 Altezza significativa misurata con il metodo zero crossing

Dove:

j non indica la sequenza temporale delle onde, ma indica la sequenza delle onde ordinate per altezza decrescente. Studi sperimentali hanno dimostrato che l'altezza d'onda significativa misurata con tale metodo è simile a quella misurata a vista.

Talvolta viene utilizzata $H_{1/10}$, la media delle altezze di un decimo delle onde più alte registrate, nell'Equazione 4.

$$H_{1/10} = \frac{1}{N/10} \sum_{j=1}^{N/10} H_j$$

Equazione 4 Altezza media di un decimo delle onde più alte

Allo stesso modo possono essere definiti diversi valori di periodo.

Nell'Equazione 5 è riportato il periodo medio.

$$T_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} T_i$$

Equazione 5 Periodo medio

Il periodo d'onda significativo $T_{1/3}$, analogamente a quanto accade per l'altezza d'onda, viene definito come il periodo medio di un terzo delle onde più alte, è espresso nell'Equazione 6.

$$T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_j$$

Equazione 6 Periodo significativo

Dove:

j non indica la sequenza temporale delle onde, ma indica la sequenza delle onde ordinate per altezza decrescente.

Così come per l'altezza d'onda, talvolta viene utilizzato il periodo medio di un decimo delle onde più alte, $T_{1/10}$, definito dall'Equazione 7.

$$T_{1/10} = \frac{1}{N/10} \sum_{j=1}^{N/10} T_j$$

Equazione 7 Periodo medio di un decimo delle onde più alte

È fondamentale conoscere le relazioni che ci sono tra le diverse espressioni con cui è possibile calcolare ciascuna grandezza. Per quanto riguarda l'altezza d'onda si può approssimare che $H_{1/3} \approx H_v$ in quanto dai dati sperimentali emerge la relazione riportata nell'Equazione 8, che è valida se le grandezze sono entrambe misurate in metri.

$$H_{1/3} = 1.67 H_n^{0.77}$$

Equazione 8 Relazione tra l'altezza d'onda significativa misurata con l'analisi zero crossing e quella stimata a vista Inoltre è importante sottolineare che $H_{1/3}$ è ovviamente maggiore dell'altezza massima raggiunta durante la registrazione, H_{max} . Il valore del rapporto tra H_{max} e $H_{1/3}$ oscilla tra 1.8 e 2.0 ed è tuttavia meno accurato perché più set di dati possono avere lo stesso $H_{1/3}$, ma difficilmente avranno la stessa H_{max} . Il massimo è legato al moto ondoso ed alla durata della misurazione: più è lunga più è probabile che si ottenga un valore massimo. Si può quindi affermare che la altezza d'onda massima corrisponde circa al doppio di quella significativa.

Il periodo significativo misurato a vista non coincide con il valore misurato con l'analisi *zero crossing*. Infatti tra queste due grandezze vi è la relazione riportata nell'Equazione 9.

$$T_{1/3} = 2.83 T_v^{0.44}$$

Equazione 9 Relazione tra il periodo significativo misurato con l'analisi zero crossing e quello stimato a vista

Dopo aver definito queste grandezze è possibile studiarne la distribuzione statistica. La Figura

18 riporta il grafico ad istogrammi delle altezze d'onda. Nelle ordinate è riportato il numero di

onde nelle rispettive classi di altezza d'onda, definite nelle ascisse. Dall'osservazione di tale

grafico si può ricavare la moda, ovvero la classe maggiormente rappresentata.

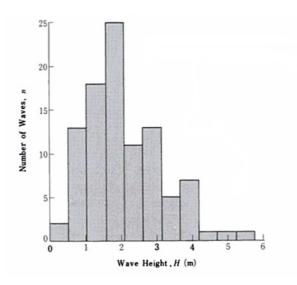


Figura 18 Esempio di istogramma delle altezze d'onda (Goda 2010)

Si può ottenere una distribuzione migliore normalizzando le altezze d'onda al loro valore medio e riportando sull'asse delle ascisse le frequenze relative n/N, divise per l'intervallo della classe di altezza normalizzata, $\Delta(H/H_m)$. In questo modo l'area sottesa al grafico è unitaria (Figura 19).

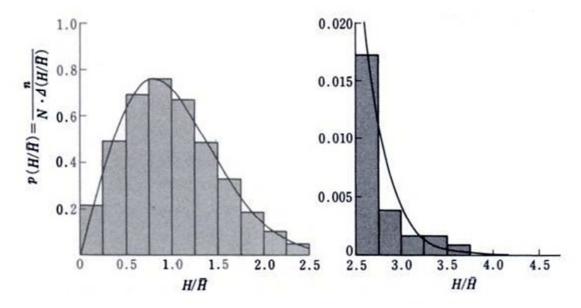


Figura 19 Istogramma normalizzato delle altezze d'onda (Goda 2010)

Tale andamento può essere rappresentato da una funzione di distribuzione teoretica, che è raffigurabile come la funzione continua presente nella Figura 19. Essa è la cosiddetta distribuzione di Rayleigh, data dall'Equazione 10.

$$p(x) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{H_m} exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H_m} \right)^2 \right]$$

Equazione 10 Distribuzione di Rayleigh

La funzione p(x) rappresenta la densità di probabilità, ovvero la probabilità che un'altezza d'onda rispetto al valor medio ricada nell'intervallo della cella i-esima che ha un'ampiezza ΔH .

Tale funzione fu originariamente trovata da Lord Rayleigh alla fine del XIX secolo per descrivere l'intensità del suono emesso da un infinito numero di sorgenti. Nel 1952 Longuet - Higgins dimostrò che questa distribuzione era applicabile anche alle onde marine e da allora la distribuzione di Rayleigh viene universalmente impiegata per descrivere le altezze d'onda (Goda 2010).

3.1.2 Analisi nel dominio della frequenza

Questa analisi è sempre a breve termine, ma è incentrata su una descrizione del fenomeno in termini di frequenza, ovvero di distribuzione in frequenza delle altezze d'onda. La descrizione del fenomeno del moto ondoso attraverso uno spettro ha lo scopo di descrivere la superficie del mare come un fenomeno stocastico, per caratterizzare tutte le possibili osservazioni che possono essere fatte sotto le medesime condizioni dell'attuale osservazione.

L'analisi ha sempre come punto di partenza una funzione $\eta(t)$, che rappresenta l'oscillazione della superficie del mare nel tempo, registrata da uno strumento ondametrico (Figura 16). Tale registrazione ha una durata temporale pari a D.

È possibile riprodurre esattamente questa registrazione come una somma di i-esime componenti armoniche, attraverso l'analisi in serie di Fuorier (Figura 20).

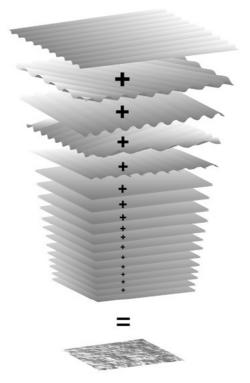


Figura 20 Scomposizione del segnale in i-esime componenti armoniche. Analisi di Fuorier (Holthuijsen 2007)

Ognuna delle componenti è caratterizzata da una frequenza f_i , un'ampiezza a_i ed una fase ϕ_i ; pertanto la funzione $\eta(t)$ è può essere espressa attraverso l'Equazione 11.

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{N} a_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)$$

Equazione 11 Rappresentazione delle componenti armoniche

L'intervallo di frequenza è dato da Δf=1/D. Attraverso l'analisi di Fourier si possono determinare i valori dell'ampiezza e della fase per ogni frequenza (Equazione 12).

$$FFT(\eta(t)) \rightarrow A(f_i) + B(f_i)i$$

Equazione 12 Trasformata di Fourier

Dove:

A(fi) e la parte reale;

B(f_i) e la parte immaginaria; $j^2=-2$

A(fi) e B(fi) sono due funzioni di fi.

Si definiscono inoltre:

$$a_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}$$

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{B_i}{A_i}\right)$$

Sostituendo questi valori nell'Equazione 11 e sommando tutte le equazioni acquisite si ottiene il segnale della registrazione inziale $\eta(t)$. Da questi valori si può comporre lo spettro per la fase e per l'ampiezza per questa registrazione.

In Figura 21 è riportato lo spettro dell'ampiezza, che rappresenta la distribuzione in frequenza delle ampiezze delle componenti armoniche del segnale. La funzione è discreta, nell'asse delle ascisse ho circa 10^3 componenti. Tra f_i e f_{i+1} ho Δf , che rappresenta la risoluzione. Essa sarà tanto più piccola quanto maggiore sarà D. Ci si ferma ad f_i =10 in virtù dell'ordine di grandezza considerato e perché le componenti sarebbero impercettibili o imputabili a semplice rumore elettrico (Cappietti A.A.2011-2012). Questo spettro fornisce già abbastanza informazioni per descrivere statisticamente l'elevazione della superficie del mare come se fosse nello stato stazionario.

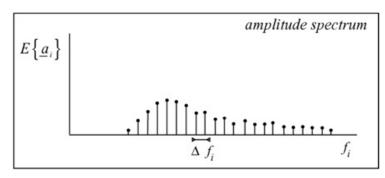


Figura 21 Spettro dell'ampiezza (Holthuijsen 2007)

Tuttavia per numerose ragioni è più rilevante presentare le informazioni nello spettro in un modo differente, ovvero considerando nell'asse delle ordinate la varianza, a_i²/2, invece che la semplice ampiezza. Quindi si considera lo spettro della varianza (Figura 22), invece che quello dell'ampiezza (Holthuijsen 2007).

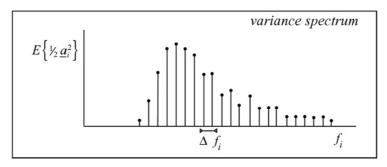


Figura 22 Spettro della varianza (Holthuijsen 2007)

Questo grafico è piuttosto semplice e fornisce numerose caratteristiche. Tuttavia sia lo spettro dell'ampiezza che quello della varianza sono basati su frequenze discrete, per cui non possono essere rappresentativi di un fenomeno naturale.

Questo problema viene superato distribuendo la varianza su tutto l'intervallo Δf_i alla frequenza f_i . In Figura 23 è mostrato il risultato di tale operazione, che è lo spettro della densità della varianza. Sull'asse delle ordinate quindi si trova l'espressione riportata nell'Equazione 13.

$$\frac{a_i^2}{2\Delta f}$$

Equazione 13

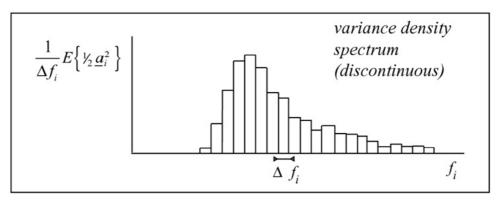


Figura 23 Spettro della densità della varianza (Holthuijsen 2007)

Questo spettro è definito per tutte le frequenze, ma è ancora discontinuo da una banda di frequenza a quelle adiacenti. Per ottenere un grafico continuo si cambia nuovamente la variabile dipendente con il limite della medesima espressione per Δf che tende a 0 (Equazione 14).

$$E(f) = \lim_{\Delta f \to 0} \frac{1}{\Delta f} \frac{a_i^2}{2\Delta f}$$

Equazione 14

In questo modo si ottiene lo spettro in frequenza (Figura 24), che fornisce una descrizione completa dell'elevazione della superficie del mare in senso statistico, a meno che possa essere visto come un processo stazionario, gaussiano. Questo implica che tutte le caratteristiche statistiche del campo d'onda possano essere espresse in termini di tale spettro (Holthuijsen 2007).

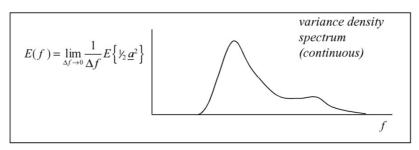


Figura 24 Funzione spettrale (Holthuijsen 2007)

La frequenza con maggiore energia è detta f_p , frequenza di picco. Si ha quindi anche il periodo di picco $T_p=1/f_p$. Esso rappresenta il periodo significativo per l'analisi spettrale. Per aumentare la risoluzione spettrale è necessario aumentare il periodo di registrazione D, quindi la quantità di componenti armoniche.

Dalla forma dello spettro si possono ricavare le caratteristiche delle onde del mare (Figura 25). Tanto più lo spettro è a banda stretta, quindi è limitato l'intervallo di frequenza, tanto più è regolare il moto ondoso (*narrow band spectrum*). Se lo spettro è stretto significa che la maggior parte delle onde hanno una frequenza vicina a f_p . Quando si ha un *narrow band*, $H_{1/3}$ e H_{m0} sono molto vicini. Quando si ha uno spettro largo significa che E(f) è diversa da zero in un grande intervallo di frequenze, il moto ondoso ha pertanto infinite componenti, per cui è fortemente irregolare, si ha la sovrapposizione di numerose componenti armoniche (Cappietti A.A.2011-2012).

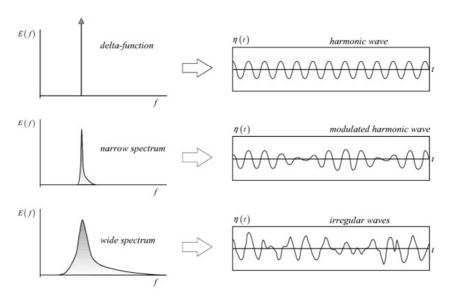


Figura 25 Correlazione tra le caratteristiche dello spettro e le caratteristiche del segnale di moto ondoso (Holthuijsen 2007)

La varianza utilizzata per la costruzione degli spettri ha anche un significato fisico, infatti essa è proporzionale all'energia del moto ondoso (Equazione 15), ovvero alla sua capacità di trasportare sedimenti, inquinanti e di provocare dei danni alle opere antropiche sulla costa.

$$\frac{a_i^2}{2} = \frac{H_i^2}{8} \propto E_i = \gamma \frac{H_i^2}{8}$$
Equazione 15

Dove:

Ei è l'energia meccanica dell'onda;

γ è il peso specifico dell'acqua.

L'energia totale relativa al moto ondoso in esame, m_0 , si calcola tramite la seguente risoluzione spettrale, riportata nell'Equazione 16.

$$m_0 = \sum_i S(f_i) \Delta f = \sum_i \frac{H_i^2}{8}$$

Equazione 16 Energia totale del moto ondoso in esame

L'altezza significativa calcolata con l'analisi nel dominio della frequenza, H_{m0} , è data dall'Equazione 17.

$$H_S = H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$$

Equazione 17 Altezza significativa misurata con l'analisi nel dominio della frequenza

Si noti che dal punto di vista matematico m_0 è il momento di ordine zero della funzione 2 ed è dato dall'Equazione 18.

$$m_0 = \int_0^\infty s(f)df$$

Equazione 18 Momento di ordine zero della funzione S(f)

Il periodo medio può invece essere calcolato in diversi modi (Equazione 19 e Equazione 20):

$$T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

Equazione 19

$$T_{m\ 0,1} = \frac{m_0}{m_1}$$

Equazione 20

L'Equazione 20, in particolare, fornisce valori molto simili a quelli ottenuti attraverso l'analisi *zero crossing*.

 $m_i = \int_0^\infty s(f) f^i df$

² Momento di ordine i di una funzione:

Sono state proposte numerose forme analitiche che forniscono una conoscenza della funzione continua attraverso spettri analitici parametrici, con una struttura simile a quella nell'Equazione 21. Esse sono state formulate attraverso l'analisi di tanti eventi ondosi, in diverse parti del mondo.

$$S(f_p, H_s, A_1, A_2, A_3)$$
Equazione 21

La variabile ed i parametri sono combinati in diversi modi, soprattutto con elevamenti a potenza. Una funzione molto usata, che approssima molto bene lo spettro del relativo moto ondoso è la funzione JONSWAP(*Joint North Sea Wave Project*), riportato nell'Equazione 22.

$$S(f) = B_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} exp \left[-1.25 \left(T_p f \right)^{-4} \right] \gamma^{exp \left[-\left(T_p f - 1 \right)^2 / 2\sigma^2 \right]}$$
 Equazione 22 Spettro di JONSWAP

Dove:

$$\begin{split} B_{J} &= \frac{0.0624}{0.230 + 0.0366\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma]; \\ T_{p} &\approx T_{1/3} / [1 - 0.32(\gamma + 0.2)^{-0.559}]; \\ \sigma &= \begin{cases} \sigma_{a} : f \leq f_{p} \\ \sigma_{b} : f \geq f_{p} \end{cases}; \end{split}$$

il parametro γ è il parametro di elevazione, che varia tra 1 e 7 e determina la forma del picco spettrale. Il valore 1 caratterizza un picco basso ed uno spettro largo (*broad band*). Il valore 7 definisce un picco alto ed uno spettro stretto, onde regolari formate da lontano e che si propagano senza incontrare ostacoli per molti km (onde di *swell*). Nel Mare del Nord il valore tipico è 3.3, mentre nel Mediterraneo varia tra 2 e 3. Tanto più si hanno bacini estesi tanto più si hanno valori alti perché si possono avere onde di *swell* per gli ampi *fetch*. Il valore di γ pari a 1 corrisponde ad un altro spettro precedente conosciuto in letteratura con il nome di Pierson-Moskowitz, da cui è stato sviluppato lo studio per lo spettro JONSWAP.

Il percorso che è stato seguito può essere effettuato anche in direzione opposta: partendo da valori di H_{m0} , T_p e parametri noti si può sostituirli in una funzione parametrica, tipo quella di JONSWAP e attraverso tutti i passaggi visti ottenere il segnale delle onde.

3.2 Spettro direzionale

Il mare reale è considerato come la somma di infinite onde sinusoidali aventi propria frequenza, fase e direzione, quindi la sua rappresentazione più completa sarà quella fornita dallo spettro direzionale, riportato in Figura 26 e nell'Equazione 23:

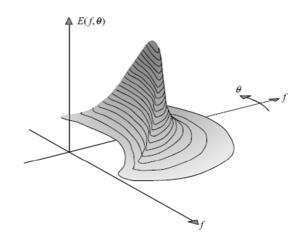


Figura 26 Spettro direzionale (Holthuijsen 2007)

$$S(f,\theta) = S(F)G(f,\theta)$$

Equazione 23 Spettro direzionale

Dove:

 $G(F,\theta)$ è la funzione di *spreading* direzionale e rappresenta la distribuzione dell'energia per direzione;

S(F) è la distribuzione di energia per frequenza.

 $G(F,\theta)$ varia con la frequenza e solitamente viene normalizzata in modo che si abbia l'Equazione 24.

$$\int_{-\pi}^{\pi} GF(f,\theta)d\theta = 1$$

Equazione 24

La forma tipica di questa funzione è quella di Mitsuyasu e Mizuno (1976), riportato nell'Equazione 25.

$$G(f,\theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Equazione 25 (Mitsuyasu e Mizuno 1976)

Dove:

 θ è l'azimuth misurato in senso antiorario rispetto alla direzione principale del moto ondoso; G_0 è una costante;

s è il parametro di *spreading*, legato alla frequenza e rappresenta il grado di concentrazione dell'energia rispetto alla direzione principale. Sperimentalmente è stato riscontrato che il valore massimo di s, s_{max} , è legato alla velocità del vento secondo l'Equazione 26 (Cappietti A.A.2011-2012).

$$s_{max} = 11.5 \left(\frac{2\pi f_p u}{g}\right)^{-2.5}$$

Equazione 26

4 Propagazione del moto ondoso da largo a costa

4.1 Suddivisione funzionale della fascia costiera

La costa può essere suddivisa in diverse zone secondo differenti criteri, che riguardano l'interazione tra le onde e la sua morfologia (Figura 27).

La divisione più elementare riguarda il rapporto tra la lunghezza d'onda e la profondità:

$$d > \frac{L}{2}$$
 acque alte;

$$\frac{L}{20} < d < \frac{L}{2}$$
 acque intermedie;

$$d < \frac{L}{20}$$
 acque basse.

Un altro criterio utilizzato per la suddivisione della fascia costiera è il comportamento delle onde durante il progressivo avanzamento verso riva:

- offshore: zona in cui le acque sono profonde e le onde si propagano senza subire variazioni nei loro parametri, che quindi risultano indipendenti dal fondale;
- shoaling zone: dove la profondità diminuisce fino a provocare il fenomeno del frangimento. È la zona in cui si ha modificazione dei parametri delle onde che si spostano dal largo a costa. Qui si ha la suddivisione in *outer zone*, ovvero la zona esterna alla zona dei frangenti ed *inner zone*, la zona interna alla zona dei frangenti;
- breaking zone: area in cui le onde cominciano a frangere;
- *surf zone*: zona dove le onde sono tutte in frangimento;
- swash zone: area in cui le onde giungono a riva risalendo la battigia.

In base ad una classificazione idrodinamica, basata sull'interazione tra le onde ed il fondale, il profilo topografico presenta cinque unità principali che, da mare verso terra sono la zona offshore, la zona di transizione (offshore transition), la spiaggia sottomarina (shoreface), la spiaggia intertidale (foreshore), la spiaggia emersa o retrospiaggia, compresa fra la battigia e il fronte delle dune (backshore) (Cappietti A.A.2011-2012).

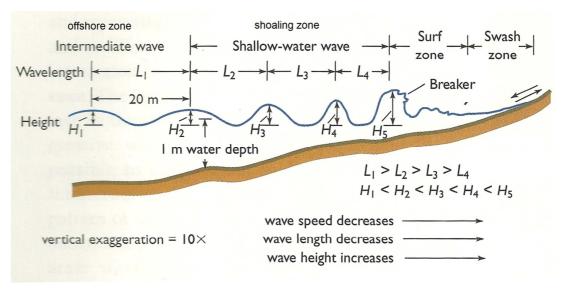


Figura 27 Zonazione della costa (Pinet 2009)

4.2 Descrizione qualitativa della variazione dei parametri caratteristici dell'onda da largo a costa

In acque alte le onde conservano i loro parametri caratteristici ed il moto ondoso induce alle particelle d'acqua un moto orbitale circolare chiuso, con orbita di diametro H (altezza d'onda), che conserva nel tempo la posizione media. La velocità media delle particelle si attenua rapidamente con la profondità. Le particelle situate più in profondità percorrono anch'esse orbite circolari, il cui diametro diminuisce esponenzialmente fino ad una profondità d=L/2, dove si riduce ad un centesimo rispetto a quello dell'orbita superficiale. Nelle acque alte l'onda è simmetrica, ovvero il cavo è uguale e speculare alla cresta.

In acque intermedie si assiste ad una trasformazione del moto e dell'orbita percorsa dalle particelle, che da circolare diviene ellittica, a causa dell'interazione con il fondo. Il semiasse minore ed il semiasse maggiore delle ellissi si riducono proporzionalmente all'aumentare della profondità. La lunghezza d'onda diventa progressivamente più piccola man a mano che l'onda avanza verso riva. L'altezza d'onda, invece, dopo una prima zona in cui la distanza cresta - cavo diminuisce del 2-4% rispetto a quella a largo (set-down d'onda), aumenta gradualmente man mano che l'onda si avvicina alle acque più basse. A questo punto l'onda non è più simmetrica; infatti la cresta risulta molto più distante dal livello di quiete di quanto non sia il cavo, perciò la velocità delle particelle sulla cresta è maggiore rispetto alla velocità delle particelle nel cavo. Il periodo del cavo è maggiore rispetto a quello della cresta, ma il periodo totale rimane costante. L'altezza d'onda continua ad aumentare fino a quando non si formano dei veri e propri muri di acqua e l'onda diventa instabile, a causa degli sforzi di trazione e frange, (set-up, aumento del 15%), prima di entrare nella zona di acque basse. Nel punto in cui l'onda frange,

detto *breaking point*, si ha la massima altezza d'onda raggiungibile. Subito dopo il frangimento si forma il cosiddetto *surface roller*.

In acque basse la lunghezza d'onda diminuisce gradualmente così come l'altezza. L'onda franta attiva un trasporto di massa (*mass transport*): il moto vorticoso ingloba il volume d'acqua e sedimento e la forma d'onda lo trasporta verso riva. L'energia viene dissipata nel frangimento e successivamente nel trasporto. In acque basse l'orbita percorsa dalle particelle è ellittica, come nelle acque intermedie, ma in questo caso, mentre il semiasse minore si riduce con la profondità, quello maggiore rimane della stessa lunghezza (Cappietti A.A.2011-2012).

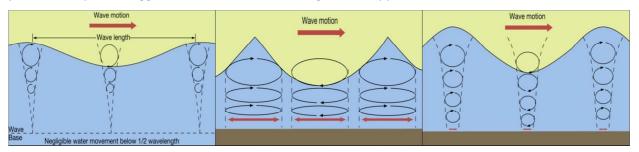


Figura 28 Movimento delle particelle d'acqua indotto dal moto ondoso in acque profonde (a sinistra), intermedie (al centro) e basse (a destra) (Pinet 2009)

4.3 Descrizione dei fenomeni che interessano la propagazione da largo a costa

I fenomeni principali connessi al moto ondoso durante la sua propagazione sono (Figura 29):

- shoaling;
- rifrazione;
- diffrazione;
- frangimento;
- riflessione.

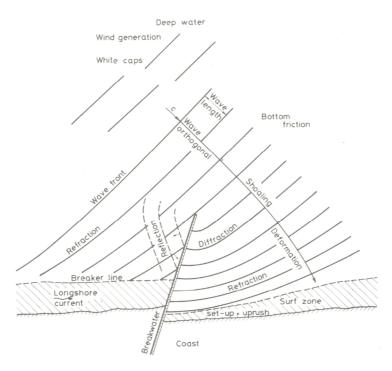


Figura 29 Fenomeni della propagazione del moto ondoso

4.3.1 Shoaling

Il fenomeno dello *shoaling* consiste nell'aumento della ripidità dell'onda, dovuta alla variazione di profondità. Per il principio della conservazione dell'energia, ad una variazione di quota del fondale corrisponde una variazione dell'altezza d'onda.

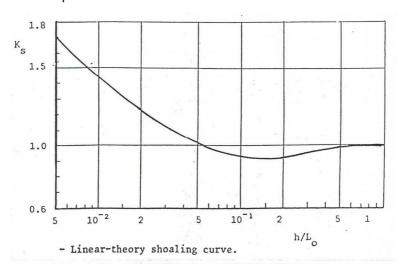


Figura 30 Curva del coefficiente di shoaling (Cappietti A.A.2011-2012)

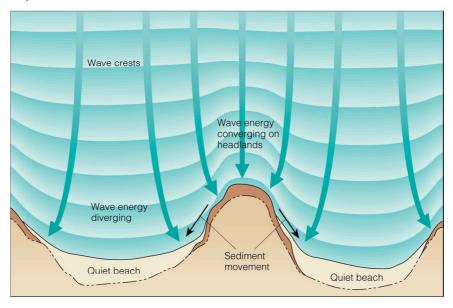
La curva in Figura 30 rappresenta l'andamento del coefficiente di *shoaling* K_S in funzione del rapporto tra l'altezza d'onda e la lunghezza, in particolare si può osservare che:

- al diminuire di h/L_0 , la curva decresce fino a presentare un minimo ($K_S \approx 0.91$);
- per acque profonde $K_s\approx 1$, quindi non si hanno deformazioni sostanziali dell'altezza d'onda poiché, per $h/L_0>0.5$, i parametri dell'onda non sono influenzati dalla profondità;

- Per acque intermedie K_s<1;
- per acque basse K_s>1 (può arrivare a 1.4÷1.5). L'onda tuttavia non può indefinitamente crescere poiché arriva al frangimento e dissipa il suo contenuto energetico.

4.3.2 Rifrazione

La rifrazione si ha quando i raggi d'onda formano un angolo diverso da zero con la perpendicolare alle batimetriche (Figura 31). Questo fenomeno consiste in una rotazione del fronte d'onda, che tende a disporsi parallelamente alle batimetriche ed alla linea di riva, quindi a ridurre l'angolo. Tale effetto si manifesta poiché in uno stesso fronte d'onda si hanno diverse profondità e quindi diverse celerità



© 2005 Brooks/Cole - Thomson

Figura 31 Rifrazione (Oceanography Lecture: Waves and Beaches s.d.)

4.3.3 Frangimento

Il frangimento si verifica quando le onde, raggiungendo un'altezza critica, perdono la loro forma, con una dissipazione più o meno violenta di energia, accompagnata da una forte turbolenza e da formazione di schiuma. In generale si assume che il fenomeno si inneschi quando la massima velocità orizzontale delle particelle supera la celerità dell'onda. Ciò può verificarsi sia a profondità infinita, per un eccesso di ripidità dell'onda, che a bassa profondità, quando gli effetti di rifrazione e *shoaling* si combinano dando luogo ad un aumento della ripidità e quindi al superamento della condizione di stabilità della superficie idrica.

Per mezzo del parametro di Iribarren (Equazione 27) vengono identificati i diversi tipi di frangimento (Figura 32), tenendo conto sia delle caratteristiche dell'onda, che della pendenza del fondale.

$$\xi_{m0} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_i/L_i}}$$

Equazione 27 Parametro di Iribarren

Dove:

H_i è l'altezza d'onda;

L_i è la lunghezza d'onda;

Θ è la pendenza del fondale.

Si ha:

- spilling (ξ<0.5) è caratterizzato da un'onda con la cresta simmetrica rispetto all'asse verticale che passa per il punto più alto della cresta stessa. Presenta schiuma sul lato della cresta dalla parte della direzione di propagazione del moto ondoso. Risulta associato a fondali orizzontali o a modesta pendenza ed a lunghezze d'onda tipiche del Mediterraneo.
- plunging (0.5<ξ<3.3) è caratterizzato da onde con una cresta non simmetrica rispetto
 alla verticale che passa per il punto più alto della cresta stessa, con la presenza di un
 "getto" e di una successiva "caduta" dalla parte della direzione della propagazione del
 moto ondoso. E' associato a fondali a media pendenza, onde di lunghezza intermedia e
 correnti litoranee imponenti.
- surging (ξ>3.3) è caratterizzato da onde che comportano un innalzamento della superficie dell'acqua prima del frangimento. E' associato a fondali con forte pendenza e onde molto lunghe. È tipico di coste rocciose o di zone con opere marittime

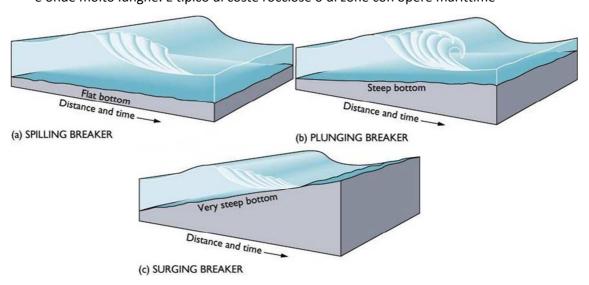


Figura 32 Tipi di frangimento (Coastal landscape:forms and processes s.d.)

4.3.4 Diffrazione

La diffrazione (Figura 33) si verifica quando un'onda incontra un ostacolo di dimensioni piccole rispetto alla sua lunghezza d'onda. Se un treno d'onde che si muove a largo incontra un'isola o

un promontorio che si estende parallelamente al fronte d'onda, parte della sua energia si diffonde lateralmente e le creste invadono la parte che dovrebbe essere protetta dallo sbarramento (ombra geometrica). In pratica, una parte dell'energia si sposta lungo le creste nella zona coperta. Calcolare i coefficienti di diffrazione è importante nel caso si progettino opere frangiflutti, moli, ed altre opere di difesa dei litorali.

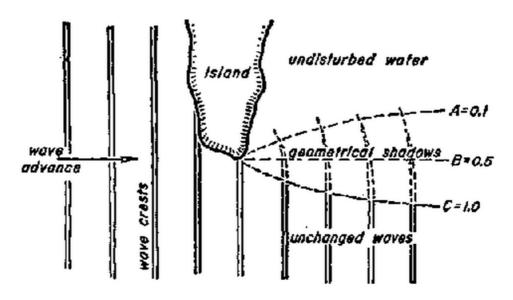


Figura 33 Diffrazione (Coastal Udel Edu s.d.)

4.3.5 Riflessione

Si verifica quando un treno di onde incontra uno sbarramento verticale come una scogliera ripida emergente da acque profonde o la parete di un molo, e si riflette su se stesso con una modesta perdita di energia. Se il periodo delle onde è regolare si genera un sistema di onde stazionarie nel quale il moto orbitale delle onde che si avvicinano all'ostacolo e di quelle che ritornano dopo la riflessione si modifica in un'oscillazione verticale e orizzontale ad una certa distanza dall'ostacolo. Le onde riflesse si scontrano obliquamente con le onde in arrivo, e lungo la linea di scontro si possono osservare zampilli e getti d'acqua provenienti da tutte le direzioni (Cappietti A.A.2011-2012).

5 Sistema di circolazione costiera indotto dal moto ondoso

I fenomeni che si hanno in conseguenza al moto ondoso sono:

- cambiamento delle dinamiche di circolazione,
- variazione del livello del mare,
- trasporto e dispersione dei sedimenti, di inquinanti e, più in generale, di traccianti.

Le correnti che interessano la zona presso la linea di riva e che quindi determinano il funzionamento e le problematiche legate al "sistema spiaggia" sono la corrente *longshore* e le correnti di *rip* e la corrente di *undertow*, che si svolgono in direzione *cross - shore*.

5.1 Dinamiche cross - shore

Nella zona di frangimento ho la generazione del *breaking bore*, un moto vorticoso roteante che ingloba un certo volume di fluido e sedimento che sovrasta la forma d'onda e che viene trasportato verso la costa, dando origine al fenomeno del *mass transport*. Quando la massa d'acqua e sedimento raggiunge la riva genera una corrente di ritorno di fondo. In flusso d'acqua dalla riva verso il mare aperto è rappresentato sia dalla corrente di *undertow*, che è un flusso generale in direzione *offshore*, su tutta la riva, sia dalle correnti di *rip*, che invece sono intense e concentrate localmente (Figura 34).

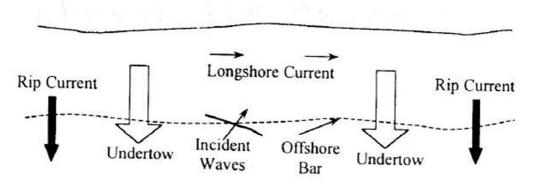


Figura 34 Sistema di correnti vicino alla riva

La corrente di *undertow* essendo distribuita su una superficie più ampia, è caratterizzata da una minore intensità rispetto il sovrastante *mass transport*, la cui sezione si estende tra la cresta ed il cavo dell'onda (Figura 35).

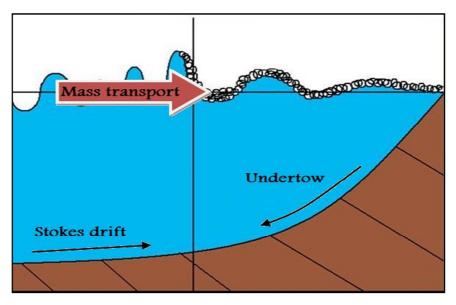


Figura 35 Sistema di correnti cross - shore

Questo divario genera un momento della quantità di moto; ed affinché la somma delle forze in gioco sia zero, si verifica un aumento del livello del mare verso riva (water set-up), stimabile in circa il 15% dell'altezza d'onda al frangimento, che genera un eccesso di spinta in grado di bilanciare le grandezze interessate. La corrente di undertow ed il mass transport hanno la medesima portata, ma la corrente di undertow ha una sezione maggiore, che aumenta con la profondità. Pertanto la corrente di undertow risulta meno intensa del mass transport e la sua velocità diminuisce progressivamente con l'aumento della profondità, fino ad annullarsi ad una certa distanza da riva, favorendo un accumulo di sedimento in tale zona. In piccola parte tale accumulo viene incentivato anche dalle orbite ellittiche non completamente chiuse delle onde in acque basse che comportano un minimo trasporto di massa (Stokes drift) dal largo verso costa, che a sua volta si annulla nel punto d'incontro con la corrente di undertow (Figura 36). Quindi a ridosso della zona dei frangenti, nel punto in cui la corrente di Stokes drift e quella di undertow si incontrano e le forze si equilibrano, i granelli del fondale si depositano. L'accumulo porta alla formazione di una barra. Le onde invernali sono più alte e frangono più al largo, quindi le barre invernali sono più distanti dalla costa rispetto a quelle estive. In ogni sistema di spiaggia, pertanto si distinguono almeno due barre per effetto del differente clima ondoso stagionale. A causa dell'irregolarità del moto ondoso non si ha una barra continua di frangimento e si formano delle zone più depresse che prendono il nome di truogoli. In essi la corrente di undertow si canalizza perché non ha sufficiente energia per sorpassare le barre, in questo modo si generano le correnti di rip. Le correnti di rip, quindi, si generano nei punti di minore resistenza, come i punti di discontinuità nelle barre. Questo è un meccanismo a feedback, poiché le correnti di rip stesse aumentano le dimensioni di queste zone irregolari. Le correnti di *rip* possono essere molto pericolose per i bagnanti perché sono molto intense e veloci e possono trascinare verso il mare aperto (Cappietti A.A.2011-2012).

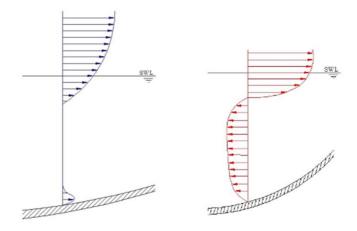


Figura 36 A sinistra: profilo delle velocità delle onde e dello *Stokes drift* al frangimento . A destra: profilo delle velocità della corrente di *undertow* e del *mass transport*

5.2 Dinamiche longshore

Nella direzione parallela alla linea di riva, la componente *longshore* del moto ondoso origina una corrente litoranea nella *surf zone*, che si svolge tra la riva e la linea dei frangenti (Figura 37). Questa corrente è responsabile della deriva netta (*drift*) di sedimento in tale zona e dell'accumulo di materiale solido nella porzione sopraflutto di strutture presenti sul litorale, ad esempio i pennelli. Per onde che hanno ampi angoli di incidenza, il momento generato lungo la linea di riva dal processo di frangimento dell'onda comporta forti correnti *longshore*. Angoli di incidenza minori generano correnti *longshore* più deboli.

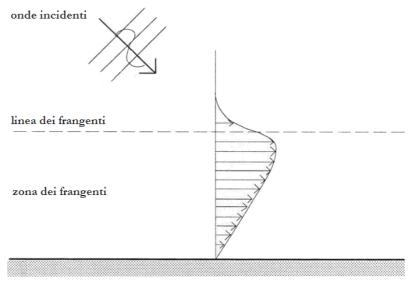


Figura 37 Profilo velocità corrente longshore (Cappietti A.A.2011-2012)

Sulla linea di battigia è presente, invece, un movimento detto *beach drift*, che provoca uno sposatmento a zig – zag delle particelle nella *swash zone* (Figura 38). Questo movimento interessa le particelle con granulometria maggiore (ghiaie), che tendono a risalire la spiaggia per saltellamento. Le particelle a granulometria inferiore (sabbie) vengono portate via dall'onda con il *run down* ed entrano nel meccanismo che si svolge in direzione *cross- shore*.

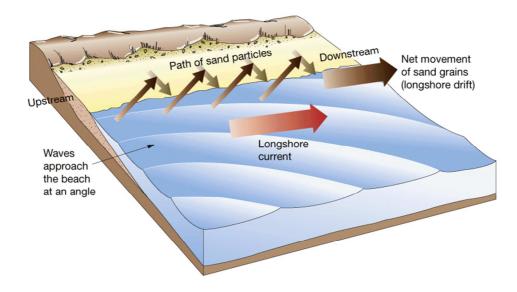


Figura 38 Beach drift e corrente longshore (Servert s.d.)

Una stima della velocità della corrente longshore può essere effettuata tramite l'Equazione 28.

$$v = 20.7m\sqrt{gH_b}\sin(2\alpha_b)$$

Equazione 28 Velocità della corrente longshore (Longuet-Higgins 1970)

Dove:

m è la pendenza media del profilo di costa;

 α_b è l'angolo di incidenza dell'onda al frangimento;

H_b è l'altezza d'onda al frangimento.

Si noti che la velocità della corrente aumenta all'aumentare dell'altezza d'onda. Se il fondale è poco inclinato, il frangimento avviene più a largo, la *surf zone* è più ampia e la corrente *longshore* si svolge in un volume maggiore, assumendo velocità minori. Se il fondale è molto inclinato, il frangimento avviene più vicino a riva, quasi improvvisamente, la surf zone si restringe e la corrente assume velocità maggiori

5.3 Morfodinamica del profilo di costa

Le dinamiche costiere che sono state descritte comportano la formazione di strutture caratteristiche del profilo della spiaggia. Nel profilo trasversale della spiaggia , sommersa ed

emersa, si individuano degli elementi morfologici (Figura 39), che sono elencati in seguito procedendo da mare verso terra:

- Le barre si formano in corrispondenza della linea dei frangenti, dove il flusso verso riva, associato all'asimmetria dei moti orbitali sul fondo (*Stokes drift*), converge con quello *offshore*, la corrente di *undertow*. Come è stato già descritto, la crescita delle barre è favorita dal fatto che, spostandosi in direzione *offshore*, il flusso perde velocità e provoca la deposizione dei sedimenti che trascinava in prossimità del fondo. Si forma così un cordone di sabbia, disposto parallelamente alla riva, che, accrescendosi verticalmente, induce al frangimento un numero sempre maggiore di onde. Le onde invernali sono più alte e frangono più al largo, quindi le barre invernali sono più distanti dalla costa rispetto a quelle estive. Pertanto in ogni sistema di spiaggia si distinguono almeno due barre per effetto della differente morfodinamica stagionale.
- Le berme si originano dal mancato allontanamento dei granuli che tendono ad accumularsi al limite della *swash zone*. Questo fenomeno forma gradualmente la cresta della berma, costituita da un cordone con forte pendenza sul lato mare e debole pendenza sul lato terra. Il processo di accrezione si arresta quando la pendenza della berma è tale che i granuli si muovono verso mare anche a causa della forza di gravità e non solo per l'azione del *backwash*. Le mareggiate più forti, che determinano un maggiore *set-up*, spingono l'acqua in alto sulla berma, erodendo le creste più basse e costruendone una nuova, più arretrata e più alta. Dopo un periodo di intense mareggiate è possibile identificare la cresta della berma più alta, detta berma di tempesta, e altre creste minori a quote decrescenti, fino a giungere alla cresta della berma ordinaria, in equilibrio con le onde meno intense del momento dell'osservazione.
- Le dune si trovano nella zona retrostante la spiaggia e costituiscono la tipica forma dovuta all'azione congiunta di vento, onde e vegetazione tipica dunale. Si sviluppano in funzione della disponibilità di materiale sabbioso e della presenza di venti con energia sufficiente per trasportarlo; per questo esse si modellano ed evolvono in stretta interazione con la spiaggia antistante.

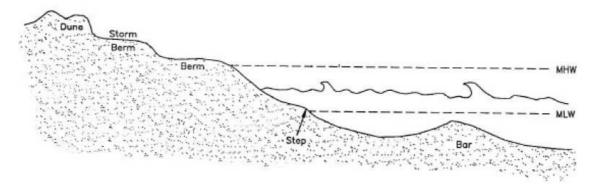


Figura 39 Strutture morfologiche presenti nel profilo trasversale della spiaggia (Szuwalski e Morang 1972)

5.3.1 Fascia attiva e profondità di chiusura

Si definisce fascia attiva la zona che va dalla linea di costa alla zona dei frangenti. Questo limite non è assoluto, è legato al moto ondoso ed alle mareggiate delle singole onde.

La profondità di chiusura di una spiaggia d_c, fissato un intervallo di tempo, è definita come la profondità più vicina alla linea di riva che non subisce variazioni significative di quota del fondo marino ed in cui lo scambio di sedimenti tra *nearshore* ed *offshore* è trascurabile (Kraus, Larson e Wise 1999).

Questa grandezza si può calcolare con una formula empirica scoperta da Hallermeier (1981), che permette, in assenza di rilievi sul campo, di ricavare la profondità di chiusura (Equazione 29). Si considera il moto ondoso che ha un tempo di ritorno di 12 anni:

$$d_c = 1.6 H_{s,12}$$
 Equazione 29

Dove:

 $H_{s,12}$ è l'altezza d'onda significativa locale, presente nel litorale in esame, superata mediamente per 12 ore all'anno.

5.3.2 Profilo di equilibrio di una spiaggia

Le dissipative beaches, ovvero le spiagge in cui la maggior parte dell'energia associata ad un'onda è dissipata attraverso il processo di breaking, subiscono forti modificazioni nel corso dell'anno. Esse sono caratterizzate da un profilo estivo (swell profile) e da uno invernale (storm profile). Le onde alte e ripide tipiche del periodo invernale muovono il materiale dalla spiaggia emersa in direzione offshore, e lo fanno depositare sotto forma di una o più barre nella zona dei frangenti. Con il variare delle caratteristiche delle onde incidenti, varia anche la morfologia del fondale, e in particolare il numero, l'altezza e la distanza da riva delle barre. Al termine della tempesta le onde divengono meno ripide (swell) ed esercitano un'azione costruttiva, spostando la sabbia verso costa. Le barre iniziano così a muoversi, diventando più basse ed asimmetriche, e possono anche raggiungere la riva fino a saldarsi alla spiaggia emersa. Le

spiagge non sono formate quindi da una semplice pendio che degrada in mare, ma si tratta di un profilo risultato del bilancio di forze costruttive e distruttive. Solitamente, al susseguirsi degli eventi meteomarini, il profilo si modifica, ma mediamente si assiste ad un comportamento di equilibrio dinamico. Quindi, anche se in pratica non si ha una condizione di equilibrio o di spiaggia completamente stabile, è comunque utile il concetto di equilibrio per studiare il comportamento evolutivo delle spiagge. Secondo Dean (1977) la porzione sommersa di un profilo medio a lungo termine può essere approssimata con l'espressione riportata nell'Equazione 30.

$$d = A_n x^{2/3}$$

Equazione 30 Profilo di equilibrio (Dean 1977)

Dove:

d è la profondità dell'acqua;

x è la distanza offshore misurata sul livello dell'acqua.

 $A_{\mbox{\tiny p}}$ è il coefficiente di profilo, che è funzione principalmente della granulometria.

5.4 Trasporto solido litoraneo

Il trasporto di sedimenti lungo la linea di riva avviene a causa del *beach drifting* e della corrente nella zona dei frangenti. Solitamente la spiaggia è formata di sedimenti gradati, dalle sabbie più fini alla ghiaia. I sedimenti più grossolani si trovano vicino alla zona di *swash*, nella zona più ripida del profilo e si muovono per *beach drifting*. Si trovano sedimenti più fini man a mano che ci si sposta verso *offshore*, distribuiti in base all'andamento della corrente *longshore* e delle dinamiche *cross – shore* (Kamphuis 2000).

Per ottenere delle stime del trasporto solido litoraneo di possono seguire due approcci diversi: puntuale o integrale.

Nell'approccio puntuale si tracciano una serie di profili perpendicolari alla linea di riva con spaziatura regolare. Per ognuno dei settori ottenuti è possibile misurare la densità dei sedimenti d_s nella colonna d'acqua e la velocità della corrente litoranea v e quindi ottenere una stima della portata in sospensione della corrente *longshore*.

Innanzitutto è necessario calcolare la massa di sedimenti che sono tenuti in sospensione ad una distanza di dalla battigia per ogni metro di fascia costiera, integrando la densità d_s , con l'Equazione 31.

$$M_s(y) = \int_0^d d_s(z, y) dz$$

Equazione 31

Questo risultato viene moltiplicato per la velocità della corrente *longshore* v e diviso per la densità del sedimento, ρ_s , e poi integrato per tutta la sezione per ottenere la stima della portata volumetrica della corrente *longshore* alla scala della *surf zone*, in Equazione 32.

$$Q_s = \frac{1}{\rho_s} \int_0^{\gamma_s} M_s(y) \, v dy$$

Equazione 32

Nell'approccio integrale si applicano le formule analitiche semplificate per la stima del trasporto *longshore* di sedimenti, espresse in funzione dell'altezza d'onda significativa al frangimento (H_{sb}), dall'angolo di inclinazione al frangimento (α_b), dalla pendenza del fondale (m_b), dal periodo delle onde incidenti (T) e dal diametro medio dei sedimenti (D). Esistono numerose espressioni che sono state formulate a questo scopo, si citano di seguito le due più applicate.

Formula del CERC (1984)

$$Q = KH_{sb}^{5/2} \sin 2\alpha_b$$

Equazione 33 Trasporto solido litoraneo (CERC 1984)

Dove:

Q viene espresso in m³/h;

H_{sb} viene espresso in m;

K è un parametro trovato empiricamente che assume valore 330 per spiagge con sedimenti medio-fini ben classati.

Questa formula parametrica esplicita non contiene il periodo T, il diametro dei sedimenti D e la pendenza del fondo m_b ; la dipendenza funzionale da questi parametri non è esplicita, ma il trasporto solido è evidentemente dipendente da essi. Tale formula quindi può essere utilizzata solo dove ho condizioni simili a quella di studio, ovvero coste oceaniche con fondali debolmente acclivi e sabbie relativamente fini. In assenza di condizioni di questo tipo, ho una forte sovrastima dei valori, anche di 14 volte.

Formula di Kamphuis (1991)

$$Q = K_K H_{Sb}^2 T_p^{\ \beta} m_b^{\ \delta} D^{\xi} sen^{\gamma} 2\alpha_b$$

Equazione 34 Trasporto solido litoraneo (Kamphuis 1991)

Dove:

α>0, ovvero all'aumentare di H, Q aumenta;

β>0, ovvero all'aumentare di T, Qaumenta;

 γ >0, quindi il sen α , e di conseguenza Q, aumenta fino a che α =45

δ>0, quindi all'aumentare della pendenza del fondale aumenta anche Q;

ξ<0, quindi al diminuire del diametro, Q aumenta.

Questa formula è più generale e contiene tutti i parametri sopra elencati, quindi in linea teorica, potrebbe fornire una stima più accurata del trasporto *longshore*. Tuttavia si ritiene che i risultati ottenuti siano una sottostima dei valori effettivi.

6 Opere di protezione della costa

Quando per carenze di alimentazione detritica la spiaggia tende a regredire e non è possibile consentire tali arretramenti per l'esistenza di opere di viabilità, abitati od anche ambienti naturali di particolare pregio, è necessario che l'uomo intervenga con manufatti o provvedimenti particolari atti a contrastare tale processo.

Salvo casi particolarissimi, è impossibile proteggere brevi tratti di costa agendo in ambito ristretto e si determinano, solitamente, gravi inconvenienti. Pertanto è oggi accettato dalle scuole più avanzate di questa disciplina che sia di gran lunga preferibile, e meno costoso, affrontare il problema della difesa costiera con un azione coordinata all'interno di una intera unità fisiografica (Pranzini 1985).

6.1 Classificazione delle opere costiere

Le opere di protezione della costa, *shore defence*, mirano alla tutela delle caratteristiche peculiari che contraddistinguono una costa, come ad esempio: forma della costa, larghezza della spiaggia o permanenza della stessa (Cappietti A.A.2011-2012).

Le opere costiere si suddividono in tre tipologie: opere di tipo rigido (hard), opere di tipo morbido (soft), e opere miste.

• Opere rigide (Hard): sono le opere che dissipano l'energia che si sprigiona sul litorale. Agiscono sulle forzanti, attenuando l'energia del moto ondoso in modo da sottoporre la costa a sollecitazioni meno intense, riducendo la movimentazione del sedimento. Questa tipologia di intervento comporta la costruzione di manufatti duraturi nel tempo e difficilmente rimovibili (Cappietti A.A.2011-2012). Essi hanno come fine l'alterazione delle dinamiche costiere in modo da trarne un vantaggio locale, mantenendo la loro forma originaria in relazione al moto ondoso. Tali opere generano l'avanzamento della linea di riva favorendo il deposito di sedimenti lungo il litorale (Dipartimento di Ingegneria delle Acque e di Chimica 2010). Le opere rigide sono:

- barriere o più propriamente frangiflutti, sono opere parallele alla linea di riva e da questa distanziate. Esse possono essere classificate in emergenti (surface piercing) e sommerse;
- o pennelli, sono opere perpendicolari alla costa;
- o muri radenti (seawalls) o, se inclinati, rivestimenti (revetments), sono opere parallele ed aderenti alla riva;
- o sistemi di difesa a T;
- o muri di protezione;
- o combinazioni dei tipi precedenti.
- Opere morbide (Soft): sono le opere che rafforzano la stabilità del litorale, hanno lo scopo di rendere meno vulnerabile la zona costiera all'azione del moto ondoso, modellandosi con esso, in modo da intensificare quelle forze che stabilizzano la spiaggia. Si tratta di opere a basso impatto ambientale, facilmente rimovibili, nel caso in cui sia necessario riportare il litorale alle condizioni originarie. Il vantaggio di tali opere risiede nella possibilità di stabilizzare la spiaggia rendendo minimo al contempo l'impatto sull'ambiente ed evitando di interferire con i naturali fenomeni di trasporto litoraneo. Le opere di tipo morbido sono:
 - ripascimenti, consistono nel versamento di materiale granulare, di caratteristiche (tessiturali, cromatiche, ecc.) compatibili con quelle del materiale nativo;
 - o sistemi di drenaggio, sono volti all'aumento della stabilità dei granuli creando dei sistemi di filtrazione, per gravità o forzata con pompe, in modo da spingere i granelli verso il basso, aumentando così le cosiddette tensioni efficaci;
 - o dune artificiali;
 - o rivestimento con geotessuti.
- Miste, prevedono la sinergia tra i due tipi di opere. Sono impiegante nel caso in cui si voglia prolungare la sopravvivenza di un'opera di tipo soft inserendone anche una di tipo hard.

La scelta della tipologia di opera da applicare viene valutata anche in base al rapporto costi/benefici che può offrire. I costi sono sia di natura economica, che di natura ambientale. Pertanto la classificazione delle opere può essere effettuata anche in base al loro impatto sull'ambiente:

- Interventi di forte impatto geoambientale:
 - o Barriere e pennelli frangiflutti a protezione della costa;
 - Costruzione di moli di diffrazione del moto ondoso e delle correnti costiere.

- Interventi di medio impatto geoambientale:
 - Ripascimento dei tratti costieri in erosione attraverso distribuzione di sedimenti prelevati altrove;
 - Scarico di inerti granulometricamente 'compatibili' lungo le aste fluviali di alimentazione a mare.
- Interventi di debole impatto geoambientale
 - o Costruzione di moli frangiflutti sommersi (sistemi di barre artificiali);
 - Ripristino di vegetazione tipica lungo la fascia di backshore come "trappola di sedimento" (Briganti, et al. 2002).

Le opere di difesa dei litorali possono essere classificate anche in base alle loro finalità (ENEA, Calamita A. ROMAINFORMA s.d.):

- Intervento localizzato, cioè limitato al solo tratto di costa coinvolto direttamente dal fenomeno erosivo;
- Intervento esteso, cioè interessante l'intera unità fisiografica ove ricade la zona coinvolta dal fenomeno erosivo.

Le caratteristiche strutturali di un'opera di protezione costiera sono:

- Deformabilità;
- Permeabilità;
- Conformazione.

In questo elaborato verranno trattate, per semplicità, soltanto le opere che sono simulabili in modo efficace con GENESIS, ovvero *seawall*, barriere, pennelli e ripascimenti.

6.2 Le opere di tipo rigido

Come è già stato accennato sopra, gli interventi di tipo rigido possono ulteriormente suddividersi in opere disposte con orientamento dell'asse principale parallelo o sub-parallelo alla linea di riva ed opere disposte con asse trasversale o sub-ortogonale alla linea di riva. Alla prima categoria appartengono i frangiflutti ed i *seawall*, mentre alla seconda i pennelli (Dipartimento di Ingegneria delle Acque e di Chimica 2010).

6.2.1 *Seawall*

Le scogliere aderenti sono strutture disposte sulla linea di riva, concepite come semplice difesa passiva del territorio retrostante, e costituiscono una metodologia efficace per stabilizzare la linea di costa, ma determinano una profonda trasformazione del paesaggio, ed in genere una perdita della spiaggia, dato che la riflessione delle onde alla loro base produce condizioni di elevata energia e quindi l'asporto dei sedimenti presenti (Pranzini 2004).

La principale funzione dei *seawall* è prevenire o alleviare le inondazioni e l'*overtopping* sulle strutture all'interno dovute a mareggiate e ad eventi ondosi. Il *seawall* appare come un muro parallelo alla linea di riva che rinforza parte del profilo (Figura 40). Tale struttura permette di preservare ciò che si trova al suo interno, ma promuove, attraverso la riflessione, l'erosione del fondale antistante. Ciò determina un profilo più ripido , che permette alle onde più alte di arrivare al *seawall*. Conseguentemente si possono avere problemi di instabilità causata dall'erosione del fondale al piede della struttura (Burcharth e Hughes 2006).

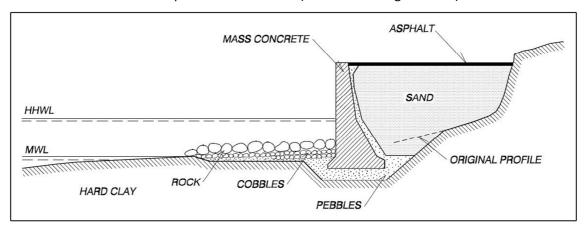


Figura 40 Seawall (Burcharth e Hughes 2006)

6.2.2 Barriere parallele distaccate

Le barriere parallele distaccate sono piccole, relativamente corte, non connesse alla riva, ma abbastanza vicine ad essa. Hanno la funzione principale di ridurre l'erosione della spiaggia. Sono costruite parallele alla costa in acque poco profonde. Possono esserci lunghe sequenze di barriere separate da gap per proteggere tratti di costa estesi. I gap tra le barriere sono, nella maggior parte dei casi, dello stesso ordine di grandezza delle barriere.

Ogni barriera riflette e dissipa parte dell'energia del moto ondoso incidente, riducendone l'altezza d'onda a tergo delle strutture e riducendo l'erosione costiera. Il sedimento trasportato lungo la spiaggia si muove nell'area a riparo della barriera e si deposita nella regione con minore energia da parte delle onde. Il moto ondoso vicino riva, che è fortemente influenzato dalla diffrazione alle teste delle strutture, può causare la formazione di salienti o talvolta di tomboli, questo rende la spiaggia simile ad una serie di *pocket beach* (Figura 41). La formazione di un tombolo o di un saliente dipende dalla lunghezza della barriera, dalla sua distanza dalla costa e dal moto ondoso incidente.

In seguito alla installazione delle barriere, oltre che a fenomeni di accumulo, si può assistere anche a fenomeni di natura erosiva. Questi ultimi ad esempio avvengono se i materiali si spostano lungo il piede esterno, per l'azione di riflessione della barriera sul moto ondoso, e

vengono deviati verso il largo causando quindi un deficit sedimentario nell'alimentazione delle spiagge sottoflutto, che entrano in erosione.

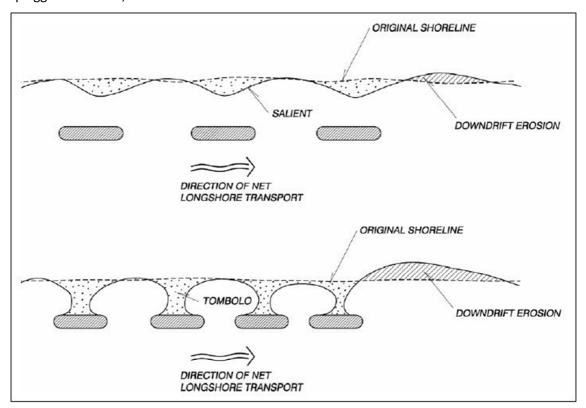


Figura 41 Barriere, formazione di tomboli e salienti (Burcharth e Hughes 2006)

La quota di cresta (berma) delle barriere distanziate può variare entro ampi intervalli determinando così i livelli di risalita dell'onda (run-up) e di portata tracimante (overtopping). Le strutture con una berma bassa sono meno impattanti visivamente, e promuovono anche la distribuzione di materiale lungo la costa. Vi sono anche barriere sommerse, che permettono maggiore movimento ancora e riducono i rischi associati all'innalzamento del livello del mare a tergo delle barriere (pilling up), causato dall'overtopping. Esso infatti provoca la formazione di correnti di rip tra i gap delle strutture, talvolta causando anche problemi di erosione ai piedi delle barriere. Un parametro che può essere preso in considerazione per risolvere tale problematica è anche la permeabilità della barriera. Il problema dell'erosione si può verificare anche nel lato verso mare delle barriere per la presenza del fenomeno della riflessione delle onde incidenti (Cappietti A.A.2011-2012).

6.2.3 Pennelli

I pennelli sono efficaci solo nel caso in cui vi sia trasporto solido litoraneo e quindi le onde non arrivino principalmente dalla direzione perpendicolare alla costa. I pennelli sono strutture strette e perpendicolari alla linea di riva, che si estendono generalmente dal retrospiaggia (a partire da un punto sufficientemente radicato a terra perché il pennello non venga aggirato dal

getto di risalita) alla prima linea dei frangenti di normale mareggiata (oltre la quale il trasporto litoraneo è trascurabile). A differenza delle barriere distaccate, che operano indirettamente sul trasporto solido costiero creando una zona di calma dal moto ondoso incidente dove è favorita la sedimentazione del materiale solido, il principio di funzionamento dei pennelli si basa sull'intercettazione diretta del trasporto solido longitudinale. L'effetto di un singolo pennello consiste nell'accrezione della spiaggia nella parte sopraflutto e nell'erosione di essa nella parte sottoflutto. L'accumulo sopraflutto continua fino a che la linea di riva non diventa ortogonale al raggio d'onda, sempre che il pennello sia abbastanza lungo, ed in questo caso si genera un blocco completo del passaggio di sedimento. Sottoflutto si ha arretramento perché non entra sedimento, ma ne esce a causa delle onde rifratte. Infatti la presenza del pennello crea un cono d'ombra che risulta più ampio di quello geometrico, all'interno del quale si originano onde rifratte molto basse.

Si possono costruire una serie di pennelli adiacenti, che producono la formazione di una giacitura planimetrica stabile della linea di riva a forma di "dente di sega" (Figura 42).

L'orientazione, la lunghezza, l'altezza, la permeabilità e lo spaziamento tra i pennelli sono le caratteristiche strutturali che determinano il cambiamento della linea di costa.

L'efficacia dei pennelli nell'intercettare i sedimenti dipende in modo prevalente dalla loro lunghezza, nel senso che all'aumentare di essa aumenta la portata solida longitudinale intercettata. Se la lunghezza è tale da intercettare l'intero trasporto solido longitudinale essi vengono definiti "lunghi" e creano una nuova sezione di chiusura all'interno dell'unità fisiografica originale, viceversa vengono definiti "corti".

Si tenga conto che a distanza pari a 5-10 volte la lunghezza del pennello non si notano più gli effetti dello stesso.

La costruzione dei pannelli a batteria deve essere iniziata da quello progettato in posizione più sottoflutto per poi costruire i restanti in modo tale da stabilizzare l'accumulo creatosi. Una progettazione ideale sarebbe costruire i pennelli di grandezza diversa: in particolare più corti i pennelli sopraflutto e con lunghezza crescente spostandosi sottoflutto.

Lungo lo sviluppo longitudinale di queste strutture, la quota di coronamento può essere posta ovunque al di sopra del livello dal mare, in tal caso si definiscono "emergenti". Se invece la quota di coronamento degrada da valori positivi a riva a valori negativi procedendo verso il largo, si definiscono "parzialmente sommersi". A parità di profondità raggiunta dalla testata dell'opera, un pennello parzialmente sommerso presenta una maggiore "permeabilità" al trasporto solido longitudinale in sospensione verso sottoflutto rispetto ad uno emergente. queste opere funzionano come un vero e proprio filtro che blocca la frazione grossolana al fondo e lascia passare la frazione fine che passa in sospensione. I pennelli possono essere

anche completamente sommersi, anche se l'esperienza sulla costa spesso ha dimostrato la loro inefficacia (Cappietti A.A.2011-2012).

I pennelli possono anche essere occasionalmente costruiti non perpendicolarmente alla linea di riva, possono essere curvi o possono essere a forma di T nell'estremità verso il mare. Le estremità verso il mare possono essere allargate per riparare una maggiore porzione di costa e per ridurre la possibilità di formazione di correnti di *rip* (Burcharth e Hughes 2006).

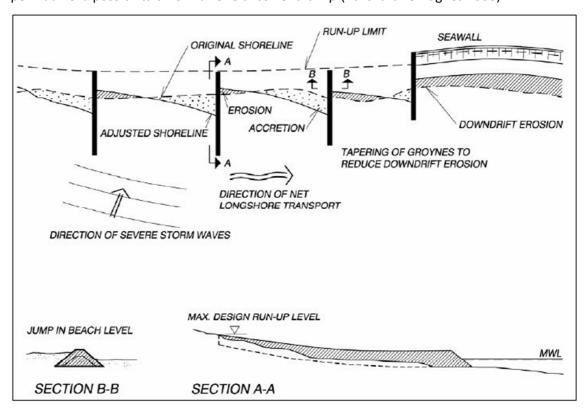


Figura 42 Pennelli e dinamiche costiere

6.3 Le opere di tipo morbido: i ripascimenti

I ripascimenti sono opere finalizzate alla prevenzione dell'erosione della linea di costa. Queste opere consistono nel posizionamento artificiale di materiale, preferibilmente di una granulometria e densità pari o maggiore di quella originale, nella zona soggetta ad erosione. Il ripascimento può portare effetti benefici anche alle spiagge sottoflutto rappresentandone una fonte di sedimento.

I sedimenti di diverse dimensioni occupano diverse posizioni nel profilo della spiaggia. Se viene posto su di una spiaggia del materiale di granulometria diversificata, si avrà un assortimento tale da poter fronteggiare le diverse condizioni energetiche che comportano la messa in sospensione delle diverse classi granulometriche. Inoltre bisogna tenere presente che una lieve pendenza del profilo è un fattore di stabilità della spiaggia, sia perché è superiore la quantità di materiale che deve essere asportato per porla in erosione, sia perché riducendo la

pendenza l'onda frange più gradualmente e quindi è minore la concentrazione di energia. Il profilo della spiaggia subito dopo la fine dei lavori è molto diverso da quello di equilibrio, ma nel corso delle mareggiate il profilo si evolve verso l'equilibrio (Figura 43). Il cambiamento che si osserva dipende fortemente dalla granulometria dei sedimenti, sabbia o ghiaia, che sono stati utilizzati durante il ripascimento. La classe granulometrica ideale risulta quella di poco superiore a quella originale, poiché piccole variazioni di granulometria rispetto quella nativa (5-10%) corrispondono a un avanzamento molto maggiore rispetto all'utilizzo di materiali molto più grossolani. Il sedimento molto fine, tuttavia, tende a depositarsi in profondità senza o con scarso vantaggio immediato per la spiaggia emersa. Sono perciò inefficaci quegli interventi intesi all'avanzamento della linea di riva effettuati mediante il semplice versamento di sabbia dragata nel fondale marino immediatamente antistante la spiaggia stessa. L'arenile viene infatti coperto con uno strato di sabbia finissima che viene a trovarsi in posizione instabile, cosicché la prima mareggiata ripristina le condizioni precedenti, trascinando la sabbia fine alla batimetria dalla quale era stata prelevata.

L'utilizzo di soli elementi molto grossolani crea il pericolo di trasformare la spiaggia che si vuole alimentare in una scogliera, con conseguente difficoltà anche per la distribuzione del restante materiale più idoneo. Nella maggior parte dei casi, per ragioni economiche, si ricorre a materiali di fortuna provenienti da scavi o a prelievi operati da lavori di altra natura. Solo in casi particolari, e soprattutto nella fase finale del lavoro di bonifica o di costruzione di una spiaggia, si impiegano materiali di elevato valore commerciale, anche provenienti da impianti di frantumazione.

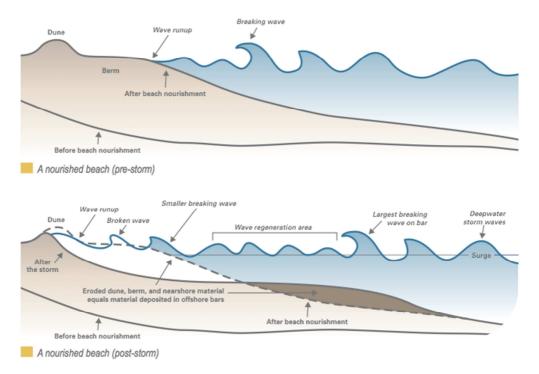


Figura 43 Ripascimento appena effettuato (sopra) e dopo le mareggiate (sotto) (Woods Hole Group 2011)

7 Il livello del mare

La superficie del mare, nonostante venga presa come riferimento per tutte le misure altimetriche e batimetriche, è soggetta ad una grande variabilità sia su diverse scale spaziali che temporali.

A causa di questa notevole variabilità, solitamente, si fa riferimento alla dicitura "livello medio del mare", che viene calcolato come valore medio delle quote assunte dal livello del mare in un arco temporale lungo, almeno un anno. Si definisce invece mare in quiete (Still Water Level, SWL) la quota della superficie orizzontale libera del mare in un dato istante, non soggetta a sollecitazioni.

La variazione del livello del mare ad una piccola scala temporale è rappresentato dal moto ondoso, analizzato nei capitoli precedenti. Quando un'onda giunge a riva la lama d'acqua risale sulla terraferma, fase di *uprush*, di una quota definita come *run up*. La quota di abbassamento verticale della linea di riva durante il moto ondoso viene definita *run down*.

Ad una scala temporale maggiore, quella dei giorni, vi sono le maree.

Ad una scala temporale media, che riguarda le settimane o i mesi, le variazioni del livello del mare sono dovute alla pressione atmosferica ed al vento: le zone di bassa pressione in mare sono caratterizzate da un locale innalzamento del livello del mare, in particolare una variazione di 1 mbar di pressione comporta un elevazione di 1 cm. Il vento, invece, può comportare delle variazioni nel livello del mare soffiando dal mare aperto verso riva determinando localmente un accumulo di acqua, detto *storm surge*.

Le variazioni del livello del mare a queste scale temporali o a scale di poco maggiori, come ad esempio le scale temporali nelle quali ricorrono le mareggiate, sono individuabili dalla differenza tra il valore del livello del mare istantaneo ed il suo valore medio.

Durante le mareggiate la differenza tra tali valori differisce a seconda della distanza dalla riva: nelle acque profonde i due valori sono uguali, in acque intermedie il valore istantaneo è inferiore rispetto a quello medio di una quota pari al 4-5% dell'altezza d'onda al frangimento. In acque basse, spostandosi verso riva, il livello istantaneo si alza sempre di più rispetto al livello medio, dando vita al fenomeno del *set up* d'onda, che mediamente raggiunge quote pari al 15-30% dell'altezza d'onda al frangimento.

7.1 Variazioni del livello del mare a grandi scale spaziali e temporali

Le variazioni del livello del mare alle scale spaziali e temporali di cui si è trattato fin ora sono importanti per la pianificazione territoriale della costa a breve termine, per l'installazione di opere di protezione, per la progettazione di opere sulla costa ecc... Tuttavia bisogna sottolineare che anche per scale temporali molto grandi, dell'ordine delle ere geologiche, il livello del mare è caratterizzato da grande variabilità sia temporale che regionale. Comprendere la variabilità di tale fenomeno ed i suoi sviluppi futuri è notevolmente importante per le popolazioni costiere ed insulari. Negli ultimi anni inoltre è stata riconosciuta la correlazione tra l'innalzamento del livello del mare ed il riscaldamento globale ed in generale con il cambiamento climatico. Pertanto è cresciuta la consapevolezza dell'importanza di capirne le cause e quantificarlo a grandi scale temporali, studiandone anche la variabilità regionale, al fine di stabilire l'entità del legame causa – effetto tra questi due fenomeni. Per perseguire tale obiettivo e per comprendere al meglio gli sviluppi futuri, è fondamentale registrare e capire i cambiamenti passati del livello del mare e le sue relazioni con altri cambiamenti (clima, volume totale di ghiaccio, variazione del potenziale di gravità, cambiamenti rotazionali, variabilità delle correnti, cambiamenti nell'evaporazione e nelle precipitazioni, ecc...) (Morner 2004).

Per analizzare il livello del mare dall'ultima glaciazione fino a 2000 anni fa sono stati studiate diverse tipologie di dati di origine geologica o biologica, come paleo barriere coralline, microatolli, scogliere o altri strati di riferimento. Durante il Quaternario il livello medio del mare ha subito oscillazioni intorno ai 100 m, dovute allo scioglimento e successiva riformazione delle calotte di ghiaccio dell'Emisfero Boreale (Rohling, et al. 2009). All'inizio dell'Olocene, quindi circa 14000 anni fa, il tasso di cambiamento è rallentato, e tra i 6000 e 2000 anni fa il livello del mare è rimasto piuttosto stabile (Lambeck, Woodroffe, et al. 2010). Da 2000 anni fa ad oggi non si hanno evidenti segni di oscillazioni del livello del mare, né dallo studio dei microfossili di ambienti di acqua salata (Kemp, et al. 2011, Lambeck, Woodroffe, et al. 2010), né dai rilievi archeologici (Lambeck, Anzidei, et al. 2004); in particolare il tasso di innalzamento non ha mai superato i 0.05 – 0.07 m ogni cento anni. In accordo con questi studi, il livello del mare durante il Medioevo (XII – XIV secolo) era di qualche decimetro più alto, mentre durante la Piccola età glaciale (XVI – XVIII secolo) era di qualche decimetro più basso. Tuttavia il tasso di crescita è rimasto basso fino all'inizio dell'era industriale (tardo XVIII fino al primo XIX secolo), quando diviene apparente un incremento di tale tasso (Kemp, et al. 2011, Gehrels, Kirby, et al. 2005, Gehrels, Marshall, et al. 2006, Woodworth, Menendez e Gehrels 2011). Nella metà del XVIII secolo nell'Europa nord – occidentale furono installati i primi mareometri, per studiare le variazioni di marea dell'Oceano. Questi strumenti hanno consentito di ottenere i dati che, corretti, hanno permesso di studiare la variazione del livello del mare da quegli anni in poi (Mitchum, et al. 2010). La necessità di correggere tali dati deriva dal fatto che le misurazioni venivano ovviamente effettuate da un sistema solidale con il terreno e quindi in regioni particolarmente attive dal punto di vista tettonico e vulcanico od in aree soggette a particolare subsidenza, dovuta a cause naturali (ad es. deposizione dei sedimenti fluviali) o antropiche (ad es. estrazione di acqua o gas dal terreno), le misure erano affette dal relativo movimento del terreno. Un'altra causa importante del movimento della terraferma è il rebound post glaciale, ovvero la risposta visco – elastica della crosta terrestre alla fine dell'ultima glaciazione (detta anche Aggiustamento Isostatico Glaciale, GIA) (Meyssignac e Cazenave 2012). È importante scindere il movimento del terreno dal movimento reale del livello del mare per rendere i dati comparabili con quelli attuali. Nonostante i differenti approcci ai dati, effettuati da diversi studi sull'argomento, i risultati ottenuti indicano che c'è una grande variabilità regionale ed il tasso di crescita medio per il XX secolo è di 1.6 -1.8 mm/yr. Come si può osservare in Figura 44 il tasso di crescita del livello medio del mare del XX secolo non è lineare. Infatti vi è una variabilità tra anni e tra decadi che si impone sull'andamento medio (Meyssignac e Cazenave 2012).

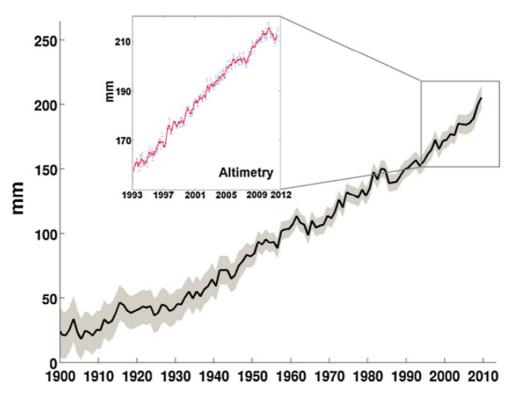


Figura 44 Curva del livello del mare nel XX secolo, in nero, e l'incertezza associata in grigio, basata sui livelli del mare passati ricostruiti usando i dati dei mareometri ed altre informazioni addizionali (Church e White 2011)

Dai primi anni '90 in poi le misurazioni del livello medio del mare sono state effettuate attraverso satelliti altimetrici. L'altimetria satellitare di precisione iniziò con il lancio di Topex / Poseidon nel 1992 ed i suoi successori, Jason – 1 (2001) e Jason – 2 (2008). Dal 1993 ad oggi il tasso globale di innalzamento del livello medio del mare ammonta a 3.2 ±0.5 mm/yr (Cazenave e Llovel 2010, Nerem, et al. 2010, Mitchum, et al. 2010). Questo tasso è significativamente maggiore rispetto alle misurazioni effettuate con i mareometri della decade precedente, ed indicano una potenziale accelerazione dell'innalzamento del livello del mare (Merrifield, Merrifield e Mitchum 2009), che tuttavia potrebbe anche essere una variabilità a carattere decennale (Cazenave, Lombard e Llovel 2008). La variabilità nello spazio e nel tempo è anche dovuta a fenomeni metereologici, come l'ENSO, ovvero El Niño Southern Oscillation, PDO Pacific Decadal Oscillation e NAO North Atlantic Oscillation.

Come è già stato detto, un obiettivo della ricerca scientifica che ha un'importanza fondamentale in questo contesto è la comprensione delle possibili cause dell'innalzamento del livello del mare, in modo tale da poter stabilire con maggiore certezza la correlazione con il cambiamento climatico globale e l'attività antropica. Semplicisticamente si può affermare che l'innalzamento del livello del mare è dovuto a due principali gruppi di cause:

- Cause che determinano una variazione volumetrica del bacino. Esse sono legate alla
 tettonica a placche (ad es. Seafloor spreading che comporta un allargamento del
 bacino oppure un margine convergente che comporta una diminuzione del volume del
 bacino).
- Cause che determinano una variazione nel volume delle masse d'acqua. Sono le cause che potrebbero essere correlate al cambiamento climatico globale. Esse verranno trattate singolarmente nel testo seguente.

7.1.1 Cambiamento della temperatura dell'oceano

L'espansione termica dell'acqua del mare comporta un innalzamento del livello dello stesso, dovuto al conseguente cambiamento di densità. Il contributo della variazione di salinità e di temperatura viene detto sterico.

Il calore immagazzinato dagli oceani, negli ultimi 50 anni, domina il bilancio termico di tutto il sistema climatico, a causa dell'enorme massa dell'acqua oceanica e della sua capacità termica. Durante gli ultimi 50 anni l'effetto sterico ha contribuito positivamente all'innalzamento del livello del mare di 0.2-0.4 mm/yr (Antonov, Levitus e Boyer 2005). Negli ultimi anni, in confronto con le decadi precedenti, il tasso di innalzamento sterico è aumentato con un contributo medio di 1.5 ± 0.3 mm/yr dal 1993 al 2003. Anche l'espansione termica, così come è stato sottolineato per l'innalzamento del livello del mare, non è spazialmente uniforme. Inoltre

è stato dimostrato, confrontando le due distribuzioni spaziali, che la variabilità dell'espansione termica è la prima causa che determina la variabilità dell'innalzamento (Cazenave, Lombard e Llovel 2008).

7.1.2 Contributo delle masse di ghiaccio

Il volume di ghiaccio totale presente sul nostro pianeta è dato dal contributo dei ghiacciai di montagna e dei ghiacciai continentali. I ghiacciai di montagna e le piccole calotte di ghiaccio sono molto sensibili al riscaldamento globale, infatti nelle ultime decadi si sono notevolmente ritirati: dal 1960 il contributo dello scioglimento di tali ghiacciai all'innalzamento del livello medio del mare è stato di 0.5 mm/yr, con una significativa accelerazione durante gli anni '90. Nel periodo dal 1993 al 2003 è stato stimato un contributo da parte dei ghiacciai pari a 0.8 ± 0.17 mm/yr (Dyurgerov e Meier 2005, Cogley 2005). Studi più recenti, come ad esempio Meier, et al. nel 2007, suggeriscono che dopo il 2003 si è nuovamente verificata un'accelerazione nello scioglimento dei ghiacciai.

Dopo i primi anni '90 le tecniche di altimetria satellitare e radar hanno permesso di evidenziare un'accelerazione pari a circa il 50% nello scioglimento dei ghiacci della parte meridionale della Groenlandia, mentre è stato rilevato un leggero innalzamento della parte centrale (Johannessen, et al. 2005, Krabill, et al. 2004).

Nel continente antartico è stata rilevata un'accelerazione della perdita di massa di ghiaccio nella parte occidentale del continente, mentre nella parte orientale l'aumento delle precipitazioni nevose ha provocato un aumento della massa (Thomas, et al. 2004, Davis, et al. 2005, Zwally, et al. 2005). Pertanto in Antartide si è instaurato una sorta di situazione di equilibrio, con una lieve dominanza delle perdite, quindi il suo contributo all'innalzamento del livello del mare è limitato.

Nel periodo dal 1993 al 2003 il contributo medio all'innalzamento del livello del mare dalla Groenlandia e dall'Antartide è stato rispettivamente di 0.2 ± 0.04 mm/yr e di 0.21 ± 0.17 mm/yr (Lemke 2007).

7.1.3 Contributo derivante dagli utilizzi delle acque interne

Un altro potenziale contributo all'innalzamento del livello del mare è dato dai cambiamenti nella quantità di acqua trattenuta nel continente dovuti alla naturale variabilità del clima e all'attività antropica. Questo contributo è il più controverso da analizzare, poiché alcune attività antropiche comportano una crescita del livello ed altre una decrescita e quindi è fondamentale fare un bilancio. Le attività antropiche che possono influenzare il quantitativo di acqua che viene immagazzinata nel suolo sono la creazione di riserve ed acquiferi attraverso la costruzione di dighe, il prelievo di acqua dal sottosuolo, l'irrigazione, l'urbanizzazione e la

deforestazione (Cazenave, Lombard e Llovel 2008). Ngo-Duc, et al. nel 2005 hanno riportato 1 – 2 mm di fluttuazione del livello del mare per decennio in seguito a cambiamenti delle quantità di acqua immagazzinata nel suolo. Ramillien, et al. (2008) hanno analizzato il cambiamento netto di volume dei 27 più grandi laghi del mondo dal 2003 al 2006 ed hanno riscontrato che è leggermente negativo ed è corrispondente ad un innalzamento del livello del mare pari a 0.2 ± 0.1 mm/yr. Concludendo si può quindi affermare che le acque interne hanno un contributo potenzialmente significativo su una scala temporale interannuale, ma nel lungo termine hanno un ruolo minore, almeno per quanto riguarda le decadi passate (Cazenave, Lombard e Llovel 2008).

In Tabella 2 sono riportati i contributi discussi nella parte precedente riguardante il decennio 1993 – 2003, che ammontano ad un totale di circa 2.7 mm/yr. Questi dati sono concordi con i rilievi altimetrici satellitari.

| Rate of sea level rise | 1993-2003 mm/yr | 2003-2008 mm/yr |
|--|-----------------|-----------------|
| 1. Thermal expansion | 1.6 ± 0.3 | 0.37 ± 0.1 |
| 2. Glaciers | 0.8 ± 0.1 | 1.1 ± 0.25 |
| Greenland | 0.2 ± 0.04 | 0.4 ± 0.05 |
| Antarctica | 0.2 ± 0.17 | 0.55 ± 0.06 |
| 3. Total ice sheets | 0.4 ± 0.2 | 0.95 ± 0.1 |
| Land waters | | 0.2 ± 0.1 |
| Sum of $1 + 2 + 3 + 4$ | 3 ± 0.5 | 2.6 ± 0.3 |
| Observed (satellite altimetry GIA applied) | 3.1 ± 0.4 | 2.5 ± 0.4 |

Tabella 2 Bilancio della massa dell'acqua di mare per il decennio 1993 - 2003 e 2003 - 2008 (Cazenave, Lombard e Llovel 2008)

7.1.4 Importanza dell'impatto antropico

Molti studi, come ad esempio quello di R. Gehrels, hanno confermato che l'uomo ha avuto un impatto misurabile sul livello del mare sin dal 1900. Molti modelli dimostrano l'influenza della concentrazione dei gas serra sul livello del mare, a causa della loro importanza per l'aumento dell'espansione termica e dello scioglimento dei ghiacci. In Figura 45 sono riportati i risultati di due differenti simulazioni dell'andamento del livello del mare negli ultimi 500 anni. Nel grafico in blu è riportata la variazione del livello del mare nell'ipotetico caso in cui non agisse nessun fattore antropogenico, ma solo fattori naturali. In rosso invece è riportato l'andamento del livello del mare reale, quindi influenzato dalle cause antropogeniche. Si può osservare come nel ventesimo secolo sia stata determinante l'influenza antropica.

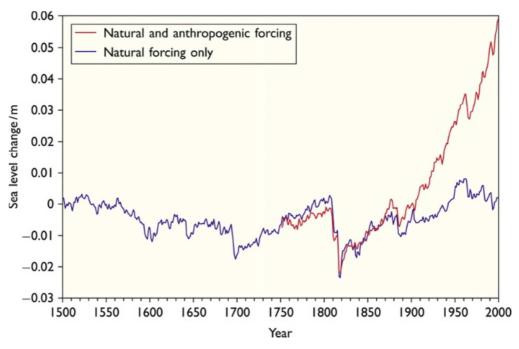


Figura 45 Simulazioni di un modello per lo studio dell'innalzamento del livello del mare negli ultimi 500 anni. In blu è riportato l'andamento causato unicamente dalle cause naturali, in rosso è riportato l'andamento dato anche dalle forzanti antropiche (Gregory, Lowe e Tett 2006)

La relazione esistente tra il livello del mare e la concentrazione dei gas serra è confermata anche dai dati geologici. Ad esempio, quando nel nostro pianeta la concentrazione di CO₂ era superiore a 1000 ppm, all'incirca 70 milioni di anni fa, il ghiaccio era assente ed il livello del mare era 73 m più alto di quello attuale. Anche se sia i dati relativi alla concentrazione di CO₂ in atmosfera, che quelli relativi all'innalzamento del livello del mare alla scala temporale geologica sono caratterizzati da incertezza, è sicura la loro correlazione (R. Gehrels s.d.).

In Figura 46 sono riportati nel grafico "a" l'andamento della concentrazione di CO_2 durante gli scorsi 400.000 anni misurata dai prelievi delle carote di ghiaccio in Antartide. Nel grafico "b" sono riportati i cambiamenti dei livelli del mare negli ultimi 400.000 anni nel Mar Rosso. Infine nel grafico "c" è riportata la relazione tra i due grafici precedenti.

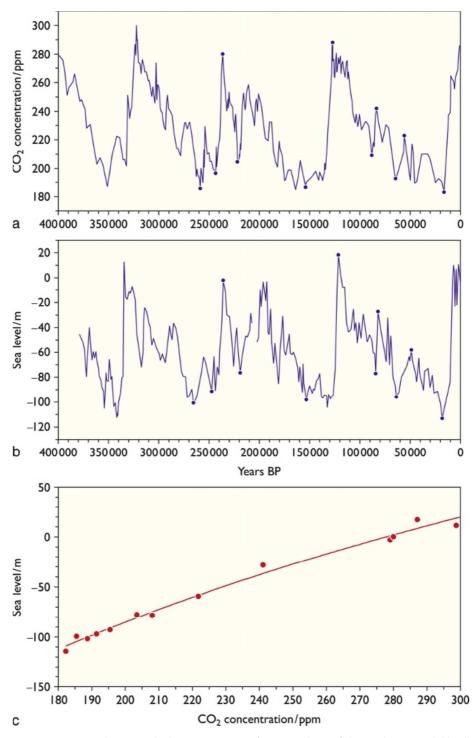


Figura 46 a. Concentrazioni di CO2 negli ultimi 400000 anni (Petit, et al. 1999). b. Cambiamenti del livello del Mar Rosso negli ultimi 400000 anni (Siddall, et al. 2003).c. Relazione tra i due precedenti grafici (R. Gehrels s.d.).

7.1.5 Previsioni future

Considerando la relazione tra la concentrazione di CO_2 e l'innalzamento del livello del mare, si può dedurre che se l'andamento della concentrazione di CO_2 nel tempo continuerà ad essere lineare, come quello mostrato in Figura 46, il livello del mare salirà ancora con ritmi elevati. I modelli climatici indicano che se nel 2100 il livello di CO_2 si stabilizzasse a 550 ppm (Alley, et al. 2005) o a 700 ppm (Meehl, et al. 2007), il livello del mare continuerebbe a crescere per almeno

altri 1000 anni. Se il livello di CO_2 raggiungesse le 1000 ppm la massa di ghiaccio della Groenlandia scomparirebbe completamente in 3000 anni, facendo alzare il livello del mare di almeno 7 m (Alley, et al. 2005).

Sono stati creati altri modelli semi – empirici (Rahmstorf 2007, 2010) che hanno stimato che dal 1990 al 2100 ci sarà una risalita del livello del mare tra 75 e 190 cm. Utilizzando un altro approccio Jones e Mann (2004), Moberg, et al. (2005), Grinsted, Moore e Jevrejeva (2010), hanno ottenuto un range di 9 – 13 mm/yr. Pfeffer, Harper e O'Neel (2008) utilizzando dei modelli dinamici dei ghiacciai hanno fissato il limite massimo e quello minimo per l'innalzamento del livello del mare rispettivamente a 80 e200 cm ed hanno stimato un valore più plausibile pari a 0.8 m. Rignot, et al. (2011) hanno stimato che se la perdita di massa dalla Groenlandia e dall'Antartico continua al ritmo attuale rilevato, nel 2100 il tasso di crescita del livello del mare sarà di 5.63 mm/yr. Basandosi sullo studio dei ghiacciai alpini e della loro area di accumulo, hanno stimato che se il trend delle temperature in futuro seguirà l'andamento attuale, nel prossimo secolo il contributo all'innalzamento dovuto allo scioglimento dei ghiacci triplicherà, arrivando a valori medi di 3.73 mm/yr. Secondo il rapporto del IPCC del 2007, considerando gli effetti del riscaldamento globale, nel 2100 il livello del mare sarà circa 40 ±15 cm in più rispetto a quello attuale (Meehl, et al. 2007).

Aldilà dei diversi approcci e risultati ciò che appare chiaro è che lo scioglimento dei ghiacci diventerà una causa forzante sempre più importante e che valori di futuri tassi di innalzamento del livello del mare pari a 10mm/yr sono plausibili.

Il problema dell'innalzamento del livello del mare è un argomento che suscita particolare attenzione negli studiosi del clima a causa delle sue relazioni con il riscaldamento globale, come è stato messo in evidenza nel testo precedente. Inoltre vi è molta incertezza riguardo all'impatto che l'innalzamento avrà sulle coste. L'effetto immediato sarà l'incremento delle alluvioni costiere, così come delle intrusioni di acqua salata nelle acque interne. L'impatto sarà proporzionale all'innalzamento relativo del livello del mare prodotto dalle cause climatiche e non.

Il software con cui è stato elaborato il modello numerico oggetto del presente elaborato non tiene conto dell'innalzamento del livello medio del mare, che viene considerato costante per tutta la durata della simulazione. Questo aspetto quindi costituisce un'assunzione di base del modello. La pendenza media della costa dell'area oggetto di studio nella zona della battigia è dell'1.61% (Cipriani, S., et al. 2001), pertanto ponendosi nel caso di innalzamento del livello medio del mare di 10 mm/yr, considerando una simulazione di 30 anni, si ottiene un avanzamento della linea di costa di 186 cm. Pertanto l'assunzione che viene effettuata dal modello, può essere ritenuta accettabile. Questa affermazione è veritiera se si considerano le

finalità principali del modello in questione, che non sono quelle di determinare esattamente la posizione della linea di riva futura, ma piuttosto di individuare quali siano i trend futuri e le zone di accumulo e di erosione a grande scala spaziale, per poter effettuare una gestione integrata della costa.

Tuttavia è necessario sottolineare che l'innalzamento del livello del mare deve essere tenuto di conto nella pianificazione della costa a lungo termine. È necessario che vengano prodotte delle mappe di rischio delle coste in rapporto a tale fenomeno, per poter individuare quali siano gli interventi che possano essere messi in atto per ridurre al minimo i rischi per le popolazioni e per gli ecosistemi costieri in generale. Bisogna tenere conto del fatto che anche se l'innalzamento del livello del mare non comporta un eccessivo avanzamento della linea di costa, come avviene per le coste molto pendenti, esso aumenta comunque la pericolosità degli eventi estremi costieri, come ad esempio le tempeste (Seneviratne, et al. 2011).

8 Inquadramento territoriale dell'area di studio

L'area oggetto del presente studio è la porzione del litorale della Toscana settentrionale che si estende dal Porto di Carrara (MS) al Porto di Viareggio (LU) (Figura 47). L'estensione di tale tratto è circa 25 km ed attraversa due province: Massa Carrara nel tratto settentrionale e Lucca nella Versilia e nel tratto meridionale; ed i seguenti comuni: Carrara, Massa, Montignoso, Forte dei Marmi, Pietrasanta, Camaiore e Viareggio. Tale porzione di litorale costituisce una sub – unità fisiografica che si inserisce all'interno dell'unità fisiografica che si estende da Livorno a Bocca di Magra (SP) (Aiello, et al. 1976). La costa varia la propria esposizione passando da una direzione NE – SW, all'estremità settentrionale, ad una quasi N – S nel tratto meridionale.

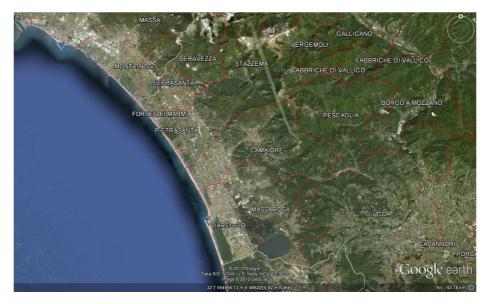


Figura 47 Area oggetto di studio

Il retroterra è costituito dall'ampia pianura di Pisa, costruita dai sedimenti del fiume Arno e, subordinatamente, da quelli del fiume Serchio, e dalla fascia costiera pedemontana Apuo – versiliese, caratterizzata prevalentemente dai sedimenti portati dal fiume Magra ma anche, in particolare nel settore settentrionale, da quelli che provengono da numerosi corsi d'acqua minori che scendono dalle Alpi Apuane, tra i quali il fiume Frigido è il più importante.

L'area oggetto di studio è caratterizzata da un elevato grado di antropizzazione, dovuta inizialmente alle attività portuali di Carrara e di Viareggio e, successivamente, allo sviluppo dell'attività turistica che vede in Marina di Massa, Forte dei Marmi e nella stessa Viareggio i centri principali. Il sistema dunale delle spiagge è stato quasi completamente smantellato per fare spazio alla viabilità costiera e al tessuto urbano, che conserva al suo interno sporadiche tracce di questa antica morfologia.

Nell'unità fisiografica sfociano tre fiumi principali: il Magra, il Serchio e l'Arno.

Il fiume Magra sfocia all'estremità settentrionale e per lunghezza (62 km) e per estensione del suo bacino idrografico (1693 km²) è il terzo fiume dell'unità fisiografica.; esso fornisce alla costa un notevole apporto sedimentario (portata solida media annua di 632 x 10³ t/anno, secondo Cavazza (1984)). È la principale fonte di alimentazione dell'area oggetto di studio.

Il fiume Serchio, lungo 89 km, scorre in un bacino imbrifero di 1408 km 2 ed ha una portata solida media annua di 23 x 10^3 t/anno (Cavazza 1984); lo scarso apporto solido di questo fiume, dovuto alle caratteristiche litologiche del bacino ed ai numerosi sbarramenti artificiali presenti lungo il suo corso e su quello dei suoi affluenti, fa sì che il suo contributo al bilancio sedimentario all'unità fisiografica sia marginale (Cipriani, S., et al. 2001).

L'Arno, con i suoi 241 km di lunghezza e gli 8228 km 2 di estensione del bacino idrografico è il corso d'acqua principale dell'unità fisiografica al cui bilancio sedimentario contribuisce con 1524×10^3 t/anno (Cavazza 1984).

8.1 Clima meteomarino

Da quanto emerge dai precedenti studi effettuati sul clima meteomarino del litorale oggetto di studio, risulta una netta prevalenza di eventi provenienti da un settore centrato rispetto a 235°N e di ampiezza di 40°N (Cappietti e Aminti 2001). Tale caratteristica è confermata anche dai dati sul clima meteomarino forniti dall' ISPRA, che si possono osservare in Figura 48. La zona in esame è soggetta a modeste oscillazioni di marea, 35 cm secondo I.I.M. (1999), quindi le onde rappresentano le forzanti determinanti (Cappietti e Aminti 2001).

Il moto ondoso risulta avere una notevole energia, infatti vengono raggiunte altezze d'onda di 8.5 m, che corrispondono alle mareggiate principali, che provengono solitamente da 225 °N. La percentuale di eventi ondosi con altezza d'onda maggiore di 4 m, corrispondenti a mareggiate estreme è 0.36%, mentre quella degli eventi con altezza d'onda inferiore a 0.5 m, che corrispondono alle calme totali, è il 52%. Ai fini della modellazione si è scelto di considerare le onde provenienti da direzioni comprese tra 180° e 285° N, come riportato nel Capitolo 13.



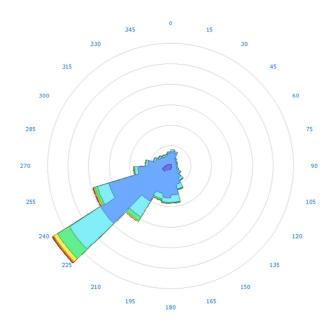


Figura 48 Diagramma polare della distribuzione delle altezze d'onda per direzione ottenuta dalla validazione dei dati dell'ondametro di La Spezia (ISPRA s.d.)

8.2 Caratteristiche del trasporto solido litoraneo

Gli studi precedenti condotti su questa unità fisiografica sono concordi sull'esistenza di un drift prevalente diretto verso S da Bocca di Magra a Forte dei Marmi e di uno diretto verso N da Bocca d'Arno a Marina di Pietrasanta (Aminti, Iannotta e Pranzini 1998, Noli e Franco 1989, De Filippi 1998). La presenza dei due drift principali è stata confermata da studi che hanno avuto differenti approcci: modelli numerici, morfologia costiera e sedimentologia (petrografia e granulometria). Un esempio di uno studio di natura sedimentologica e morfologica è quello di Pranzini (2004), dove si evidenza che i sedimenti prelevati a Forte dei Marmi e quelli alla foce del Fosso Motrone mostrano differenze composizionali significative, il primo con elementi caratteristici del fiume Magra, il secondo con quelli dei fiumi Arno e Serchio. Il flusso diretto verso N, infatti, trasporta i sedimenti dell'Arno e del Serchio, mentre quello diretto verso S trasporta i sedimenti del fiume Magra. Fra Forte dei Marmi e Marina di Pietrasanta esisterebbe una zona di convergenza dei due drift che certamente non deve essere vista come un elemento statico, ma come il risultato di convergenze diverse in funzione dei diversi stati del mare. A S di Bocca d'Arno, si osserva un'inversione della direzione del flusso dei sedimenti, che in questo tratto di costa è diretto verso Livorno. Tale inversione è dovuta, oltre che alla naturale distribuzione di una parte dei sedimenti dell'Arno, anche alla presenza delle Secche della Meloria, che danno luogo a fenomeni di rifrazione del moto ondoso. In prossimità del Porto di Livorno è stato riconosciuto un flusso di senso opposto, che impedisce la sedimentazione a ridosso delle opere foranee (Cipriani, S., et al. 2001).

8.3 Morfologia dei fondali

I fondali della zona oggetto di studio hanno un profilo trasversale concavo con una pendenza media dell'1.61% fra la battigia e l'isobata dei 5 m e dello 0.71% tra i 5 ed i 10 m; tra la battigia e l'isobata dei 10 m la pendenza media è pari allo 0.94%. Questi valori, ed in particolare quelli relativi al profilo interno, trovano comunque una forte variabilità lungo costa, a causa della diversa esposizione al moto ondoso, delle differenze granulometriche dei sedimenti di spiaggia e della presenza di opere antropiche di vario genere, il cui effetto si risente notevolmente nel primo tratto del profilo, mentre si sfuma nella parte più distale. Ciò è particolarmente vero per la zona a S del Porto di Marina di Carrara, dove l'erosione dei fondali antistanti e l'impossibilità di arretramento della linea di riva per la presenza delle difese comporta una maggiore pendenza della spiaggia (Cipriani, S., et al. 2001).

Il profilo della spiaggia è caratterizzato da un sistema multiplo di barre e truogoli, che occupa la fascia delimitata dall'isobata dei 5 m, indicando che questa è la zona dinamicamente più attiva del litorale (Chiabrera, Corradi e Fierro 1980).

8.4 Sedimentologia

L'area oggetto di studio è molto ampia e diversificata a causa di elementi naturali ed antropici, come l'inserimento di fiumi con caratteristiche e portate diverse e opere portuali e di difesa costiera. Pertanto risulta evidente che anche il range dimensionale dei sedimenti sia estremamente ampio. Le dimensioni medie variano da -33.09 phi a 3.60 phi, ossia dalle ghiaie alle sabbie molto fini, secondo la classificazione di Krumbein (1934). In generale si osserva una relazione inversa tra le dimensioni medie e la profondità, con materiali più grossolani sulla battigia e sedimenti di dimensioni progressivamente minori procedendo verso profondità maggiori. I primi mostrano, inoltre, una variabilità assai maggiore, tanto da occupare quasi completamente il range dimensionale prima descritto, anche se la maggior parte di essi si colloca tra 1 e 2.5 phi. Si noti che analizzando l'andamento del valore della granulometria dei sedimenti tra Cinquale e Bocca di Magra si ottiene una notevole dispersione dei dati, a causa della presenza di varie e differenti opere di difesa, che determina condizioni di energia estremamente variabili.

Si riconosce la presenza di due sorgenti di materiali più grossolani, l'Arno, con valori compresi tra 0 ed 1 phi ed il Magra, che immette sedimenti di dimensioni assai maggiori, fino a quasi 3 phi. Questi sembrano spingersi verso S fino al Cinquale, verso la zona di convergenza, con un salto dimensionale in corrispondenza del Porto di Marina di Carrara, che impedisce il flusso delle ghiaie lungo riva.

I sedimenti immessi dall'Arno, o prodotti dall'erosione del suo delta sommerso e dalle spiagge laterali, si spingono verso S, fino a Livorno, e verso N, fino alla zona di convergenza. Anche in questo caso, la presenza di una struttura foranea, il Porto di Viareggio, impedisce il transito delle sabbie più grossolane.

Da Marina di Pietrasanta a Forte dei Marmi, ossia in corrispondenza della zona di convergenza, si ha una distribuzione molto regolare dei valori delle dimensioni medie dei sedimenti, con la sabbia fine, ovvero compresa tra 2 e 3 phi anche vicino alla battigia ed in particolare si può osservare la scomparsa della frazione più grossolana, tra 1 e 2 phi. Procedendo verso N, tra Forte dei Marmi e Marina di Carrara, si ritrova una distribuzione molto irregolare per quanto riguarda le dimensioni medie dei sedimenti, dovuta principalmente ad una serie di opere di difesa, che alterano la distribuzione dei sedimenti. La situazione è ulteriormente complicata da ripascimenti artificiali che sono stati fatti nel corso degli anni, dei quali non si hanno indicazioni né sui volumi utilizzati, né sulle caratteristiche granulometriche dei materiali.

I sedimenti presenti nel tratto di costa oggetto di studio si presentano da molto ben classati a poco classati (0.20 phi < σ_1 < 2.99 phi) secondo la scala di Folk e Ward (1957), anche se la maggior parte di essi è compresa nelle classi molto ben classati (σ_1 < 0.35 phi), ben classati (0.35 phi < σ_1 < 0.5 phi) e moderatamente ben classati (0.5 phi < σ_1 < 0.71 phi).

I sedimenti di battigia si presentano, da Livorno fino al Cinquale, da molto ben classati a moderatamente ben classati (0.25 phi < σ_1 < 0.71 phi) in accordo con le condizioni di alta energia presenti in ambiente di battigia. A N del Cinquale fino a Bocca di Magra i valori di σ_1 per i sedimenti della battigia sono molto più elevati, raggiungendo il valore di 2.99 phi in corrispondenza della foce del Magra. Questo è dovuto al fatto che sia il Magra che altri torrenti che scendono dalle Alpi Apuane trasportano materiali grossolani; inoltre, in questo tratto di costa, sono presenti numerose opere di difesa ed il porto di Marina di Carrara che fanno si che localmente vi siano condizioni di bassa energia e quindi sedimenti poco classati (Cipriani, S., et al. 2001).

8.5 Evoluzione storica della linea di riva e dell'installazione delle opere

In epoca storica la costa compresa tra Bocca di Magra e Livorno è stata interessata da una forte progradazione, iniziata nel VI sec. A. C. e proseguita, pur con ritmi diversi e forse più brevi fasi erosive fino alla metà dell'800 (Mazzantini 1983, Pranzini 2001). Questa espansione delle spiagge fu determinata dall'intenso disboscamento avvenuto nei bacini idrografici dei fiumi che alimentano il litorale e segue in modo lineare lo sviluppo demografico e socio – economico della popolazione toscana (Pranzini 1994). Il successivo abbandono delle campagne, l'estrazione di inerti dagli alvei fluviali e la costruzione di invasi artificiali ha innescato un processo erosivo sulle spiagge adiacenti alle foce dei due fiumi che più contribuiscono all'alimentazione della costa, l'Arno ed il Magra, che si è poi gradualmente propagato ai litorali vicini (Pranzini 1989). Il confronto tra la cartografia I. G. M. I. del 1878 e quella del 1928 mostra arretramenti della linea di riva di circa 600 m sul lato settentrionale del delta dell'Arno, non protetto da opere di difesa, e di circa 500 m sulla spiaggia posta a S di Bocca di Magra (Cipriani, S., et al. 2001). I processi erosivi che interessano la parte settentrionale dell'area di interesse vennero innescati dalla riduzione dell'apporto sedimentario del fiume Magra, ma la situazione si aggravò ulteriormente in seguito alla costruzione del Porto commerciale di Marina di Carrara. Inizialmente il tratto soggetto ad erosione era limitato alle spiagge prossime al porto, ma successivamente sono stati interessati tratti sempre più estesi fino a raggiungere quasi 8 km di lunghezza. Per contrastare l'erosione delle spiagge, che già mostravano la loro vocazione turistica, furono costruite a partire dal 1930 le prime scogliere radenti a S del porto a protezione di 1200 m di strada litoranea. Un più organico progetto di difesa del litorale fu redatto nel 1941 e prevedeva cinque sole scogliere parallele emerse ciascuna di 180 m, distanti da riva da 60 a 100 m, che in buona parte proteggevano le scogliere radenti precedentemente realizzate dimostratesi insufficienti. Più a S furono costruite altre tre scogliere emerse, lunghe 350 m e con le estremità prolungate oltre le testate delle barriere contigue, fino a sovrapporsi per uno sviluppo di 20 m, per limitare la penetrazione del moto ondoso attraverso i varchi. La profondità di posa di tali scogliere era compresa tra 2 e 2.5 m. I lavori furono completati nei primi anni '50. A quella data il sistema di protezione si estendeva per circa 5 km, ovvero dal porto fino ad oltre la Foce del Torrente Ricortola. I fenomeni erosivi cominciarono a manifestarsi anche nel litorale a S non protetto che, dopo alcuni interventi sperimentali con opere isolate (piattaforme isola e scogliere parallele costruite a 20 m di distanza dalla riva), fu oggetto degli interventi nel periodo 1980 – 83 con 13 pennelli emersi distanti 180 – 200 m e lunghi 200 m, che arrivavano con la testata alla profondità di circa 4 m. Pochi anni dopo venne costruita una barriera sommersa parallela a riva che univa le testate dei pennelli creando un sistema di difesa di 12 celle. L'insieme delle protezioni del litorale di Marina di Massa come appare attualmente è riportato in Figura 49.

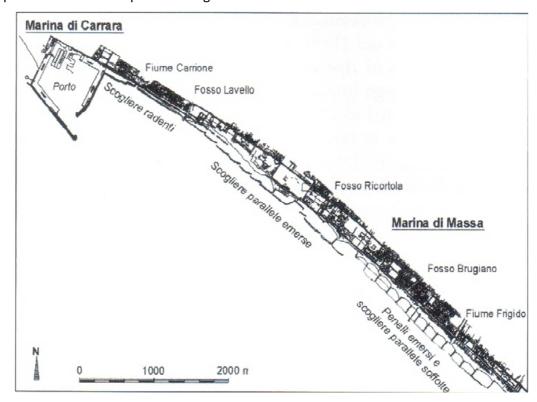


Figura 49 Opere di difesa delle spiagge di Marina di Massa (Mancinelli, et al. 2005)

Tale sistema di protezione non solo è risultato idoneo ad arrestare l'arretramento della linea di costa, ma negli ultimi 20 anni si è osservato un generale avanzamento che ha raggiunto localmente anche i 50 m; solo in un limitato tratto sul limite settentrionale sono stati necessari interventi di ripascimento (Aminti, Pelliccia e Pranzini 1983).

Tuttavia la linea di riva ha assunto in tutte le celle la tipica conformazione ad arco, è più avanzata in prossimità dei pennelli rispetto al cento della cella, provocando un notevole impatto visivo (Mancinelli, et al. 2005). Le opere hanno anche indotto un forte abbassamento dei fondali antistanti (Cappietti e Aminti 2001).

Poiché l'erosione delle spiagge sopraflutto (settentrionali) costituiva la principale fonte di sedimento per le spiagge sottoflutto (meridionali), una volta che era stato ridotto l'apporto sedimentario fluviale, questo sistema di protezione ha provocato un graduale, ma continuo, spostamento della zona di erosione verso sud. Verso gli anni '80 la zona di erosione ha raggiunto Marina di Ronchi e si è manifestata la necessità locale di costruire delle strutture simili a quelle della zona a N. Tuttavia l'impatto visivo del sistema di celle, il deterioramento della qualità delle acque a riva e lo spostamento verso S della tendenza erosiva, che avrebbe raggiunto Forte dei Marmi, una delle più famose spiagge d'Italia, hanno determinato la

decisione di non attuare la medesima tipologia di opere (Aminti, Cammelli, et al. 2004). Si decise di attuare un programma sperimentale per risolvere il problema dell'erosione senza incidere sulle spiagge delle Versilia. Tale programma iniziò nel 1999. Si costruì un primo pennello sommerso a cui ne seguirono altri tre costruiti tra l'aprile del 2000 ed il giugno del 2002, che costituirono un sistema di tre celle, come mostrato in Figura 50. Uno dei quattro pennelli è più lungo deli altri e la sua estremità risulta esterna alla barra. I pennelli sono formati da grandi sacchi di geotessile contenenti sabbia (Aminti, Cappietti, et al. 2007). Tale progetto sperimentale è ancora in corso, ma si pensa che tali pennelli possano essere utilizzati per una riqualificazione ambientale delle spiagge di Marina di Massa, che, attualmente, sono pesantemente difese con opere che vedono 9.3 km di scogliere su 6.7 km di costa (rapporto di protezione 1.4) (Cipriani, S., et al. 2001).

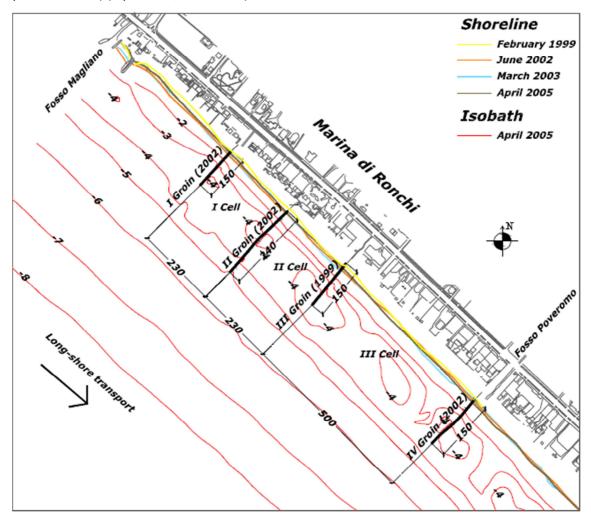


Figura 50 Disposizione dei pennelli sommersi presso Marina di Ronchi (Aminti, Cappietti, et al. 2007)

Secondo Cipriani, et al. (2001), nel tratto di litorale compreso tra il Porto di Carrara ed il Porto di Viareggio il valore della variazione areale nel periodo di tempo tra il 1938 ed il 1998 è quasi sempre positivo, tranne che negli anni compresi tra il 1954 ed il 1967, bisogna però sottolineare che i rilievi del 1967 potrebbero risentire dei danni provocati dalla forte

mareggiata del 1966. Il bilancio sedimentario complessivo tra il 1938 ed il 1997/98 risulta essere quindi positivo per 762236 m²; dunque la spiaggia è in ripascimento, grazie anche al fatto che all'interno di questo tratto di costa è presente la zona di convergenza all'interno della quale si depositano sia i sedimenti provenienti da N che quelli provenienti da S.

9 Obiettivi della tesi

Vista la necessita di acquisire informazioni sulle caratteristiche morfologiche e strutturali del tratto di costa sito tra i porti di Viareggio e Carrara, utili per la gestione integrata del litorale, che deve prevedere interventi coerenti con le caratteristiche dell'area caso di studio, in modo che si possano predisporre interventi specifici nelle zone che li necessitano, senza che questi abbiano conseguenze negative nelle aree adiacenti.

La presente tesi, pertanto, si propone i seguenti obiettivi:

- implementazione di un modello numerico per la simulazione della linea di riva del tratto di costa tra il Porto di Carrara ed il Porto di Viareggio;
- studio delle tendenze di erosive o di accrescimento della costa nell'area di interesse a media – grande scala spaziale;
- studio delle caratteristiche del trasporto litoraneo nell'area di interesse;
- studio dell'effetto macroscopico delle opere di protezione dei litorali installate negli anni nell'area di interesse;

10Modello numerico

10.1 I modelli di cambiamento delle linee di costa

Le spiagge rappresentano dei sistemi dinamici, che evolvono nel tempo e che naturalmente erodono, accrescono e cambiano topografia del fondo e della linea di costa. Vi sono numerosi fattori che determinano l'evoluzione di questi sistemi: il moto ondoso, le correnti litoranee, il vento, il livello del mare, l'apporto e la natura dei sedimenti. Questi fattori interagiscono tra loro e con le perturbazioni causate dalle opere di ingegneria costiera, come le strutture costiere, i ripascimenti, ecc.

La maggior parte dei processi che avvengono a livello costiero non sono lineari e sono caratterizzati da un'alta variabilità sia a livello spaziale che temporale (Hanson e Kraus, Tehnical Report CERC 89-19 1989).

In un sistema con queste caratteristiche è difficoltoso intervenire in modo appropriato, scegliendo degli interventi che riescano ad adattare un ambiente tanto variabile e la sua evoluzione alle esigenze che si intende soddisfare. Uno strumento che risulta estremamente utile e potente in questo contesto di pianificazione degli interventi e predizione dell'evoluzione costiera è rappresentato dai modelli numerici.

Un modello è una costruzione concettuale, a vari livelli di astrazione, che fornisce un contesto nel quale sviluppare la formulazione dei problemi che si devono affrontare e delle possibili soluzioni, organizzare ed analizzare i dati, valutare le diverse alternative proposte ed ottimizzare le selezioni.

Bisogna sempre tenere conto del fatto che questi modelli non costituiscono la realtà, ma la rappresentano solamente e che durante la loro costruzione vengono fatte delle assunzioni e semplificazioni che talvolta si rivelano discutibili. Inoltre è necessario ricordare che la modellizzazione numerica dei cambiamenti della spiaggia è un settore ingegneristico molto specialistico e tecnico. La conoscenza approfondita dell'idrodinamica costiera e dei processi di trasporto dei sedimenti sono dei prerequisiti imprescindibili per operare su questi modelli di simulazione. L'uso incauto di dei modelli e la loro scorretta interpretazione può condurre ad errori macroscopici. Pertanto i risultati della modellizzazione vanno sempre osservati ed interpretati alla luce dei comportamenti reali e verificabili di onde, correnti, e meccanismi di trasporto del sedimento che si possono osservare sulla costa. Inoltre risulta fondamentale il

supporto dell'esperienza, rappresentato dal confronto con opere effettuate in contesti analoghi a quello preso in esame.

D'altro canto il limitarsi all'osservazione sul campo e all'esperienza, senza il ricorso ad un modello numerico, non sarebbe efficiente per diversi motivi:

- la valutazione si baserebbe su opinioni di diversi esperti del settore, che potrebbero avere pareri conflittuali ed aggiungere ulteriore confusione;
- i contesti analoghi a quello preso in esame, potrebbero riportare opere inapplicabili o anacronistiche e rendere quindi l'esperienza inutile;
- le scelte avrebbero una componente soggettiva molto più marcata, poiché le alternative non risulterebbero corredate di dati numerici e quantitativi;
- i fattori coinvolti non sarebbero presi in esami in modo equamente pesato;
- senza un modello numerico non si potrebbero considerare le naturali evoluzioni temporali del trasporto sedimentario, escludendo dai possibili oggetti di analisi i sistemi estremamente complessi, quelli che verranno costruiti in diversi step temporali ed i criteri secondo i quali migliorare un progetto esistente.

Attraverso l'ausilio di strumenti appropriati si possono formulare valutazioni oggettive e promuovere analisi collettive, permettendo al progettista di non dover assumere sulla sua persona un'eccessiva responsabilità (Hanson e Kraus, Tehnical Report CERC 89-19 1989).

Per i motivi sopra delineati, a partire dai primi anni 80, si sono sviluppati numerosi modelli numerici per la predizione dei cambiamenti dei sistemi delle spiagge e quindi delle linee di costa; quello preso in analisi nella presente tesi è GENESIS (GENEralized Model for SImulating Shoreline Change).

Le equazioni alla base dei modelli di cambiamento delle linee di costa furono tracciate da Pelnard e Considere (1956), che introdussero un modello matematico, corredato delle proprie assunzioni e lo verificarono attraverso esperimenti di laboratorio. Negli anni seguenti, partendo da questa esperienza, vennero sviluppati numerosi cambiamenti e miglioramenti, che resero i modelli numerici degli strumenti sempre più utili nella gestione del sistema costiero.

Le scale temporali dei processi simulabili dai modelli numerici della linea di riva variano da alcuni mesi ad alcuni anni. Bisogna tuttavia considerare che essi sono maggiormente indicati in situazioni in cui la posizione della linea di costa varia secondo un trend sistematico di cambiamento a lungo termine. La causa dominante del cambiamento della linea di costa nel modello è la variazione spaziale del tasso di trasporto solido *longshore*. Gli effetti del trasporto *cross- shore*, come l'erosione indotta dalle tempeste o i movimenti ciclici della posizione della

linea di costa associati alle variazioni stagionali del clima, in una simulazione su un periodo lungo sono considerate nulle.

L'estensione della scala temporale su cui avviene la simulazione dipende dalle caratteristiche del moto ondoso e del trasporto di sedimento, l'accuratezza delle condizioni al contorno, le caratteristiche del progetto e la condizione della spiaggia rispetto all'equilibrio. Ad esempio, subito dopo la costruzione di un opera costiera, la spiaggia si trova molto lontana dalla sua condizione di equilibrio e quindi i cambiamenti derivanti dalla corrente *longshore* sono dominanti rispetto a quelli derivanti dai cambiamenti stagionali (a meno che l'opera in questione non sia un ripascimento). In un caso di questo tipo, in cui la spiaggia deve raggiungere la sua condizione di equilibrio dopo l'introduzione di un fattore di perturbazione, l'intervallo di simulazione deve essere dell'ordine di alcuni anni. In ogni caso si può affermare che la fase in cui la simulazione è maggiormente efficace nel modellizzare i cambiamenti di una spiaggia è quella di transizione tra uno stato di equilibrio precedente ad uno successivo.

La modellizzazione risulta invece poco efficace nei casi in cui ci si trovi di fronte a delle fluttuazioni random del sistema in cui non è individuale un trend.

La scala spaziale considerata nei modelli numerici varia a seconda della scala dimensionale dell'opera che deve essere valutata: essa può essere regionale (decine di kilometri) o più tipicamente locale (centinaia di metri). L'estensione spaziale del modello dipende oltre che dalle dimensioni fisiche del progetto, anche dall'influenza che esso può avere nelle spiagge circostanti e dalle condizioni al contorno che determinano il trasporto sedimentario (Hanson e Kraus 1989).

10.1.1 Confronto tra i diversi tipi di modelli di cambiamento delle spiagge

In Figura 51 è stato riportato lo schema di classificazione dei modelli di cambiamento della linea di costa introdotto da Kraus nel 1983 ed esteso e aggiornato da Hanson e Kraus nel 1989. Questa classificazione si basa sulla scala temporale e spaziale di applicazione, stimata considerando l'accuratezza dei modelli ed i costi di calcolo. Questi range si possono espandere nel momento in cui si ampliano le conoscenze riguardo i sedimenti nella zona costiera, viene acquisita esperienza nell'uso del modello, diventano maggiormente disponibili i dati sul moto ondoso e la posizione della linea di costa e diventano ottimali gli schemi numerici (Hanson e Kraus, Tehnical Report CERC 89-19 1989). In questo schema troviamo numerosi tipi di modelli: i modelli analitici (analytical), i modelli di erosione del profilo costiero (profile change), i modelli di cambiamento della linea di costa (Shoreline GENESIS) ed quelli a tre dimensioni schematici (3-D).

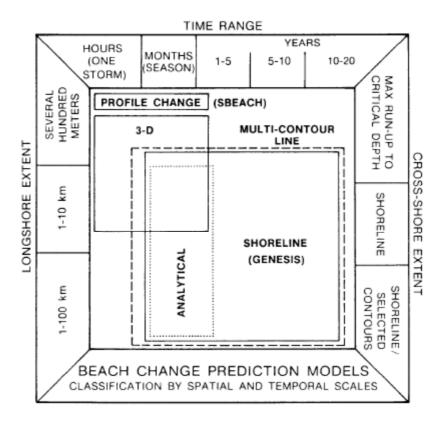


Figura 51 Confronto tra i modelli di cambiamento della linea di costa (Hanson e Kraus 1989)

I modelli analitici sono soluzioni matematiche in forma implicita di equazioni differenziali semplificate per il cambiamento della linea di costa. Per ottenere queste soluzioni sono richieste numerose ipotesi semplificative di partenza, come l'assunzione delle onde costanti nello spazio e nel tempo. Per questo motivo i modelli analitici sono troppo grossolani per essere impiegati nella pianificazione o progettazione vera e propria, ma possono essere utili nelle fasi preliminari per identificare i trend caratteristici del sistema e le sue variabili principali.

I modelli di erosione del profilo della costa sono utilizzati prevalentemente per analizzare il cambiamento della spiaggia nella porzione superiore o l'iniziale adattamento del sistema dopo un ripascimento. Questo modello è semplificato rispetto agli altri perché trascura completamente il trasporto in direzione *longshore*.

I modelli 3-D schematici descrivono i cambiamenti nella quota del fondale, che può variare sia in direzione *longshore* che *cross- shore*. In questi modelli vengono fatte spesso assunzioni semplificative come la limitazione della forma del profilo oppure il calcolo del trasporto globale piuttosto che puntuale. Sono modelli estremamente complessi e richiedono che gli operatori siano molto esperti. Inizialmente i modelli 3-D erano "modelli a due linee" (Bakker 1968), che successivamente sono stati evoluti in modelli a n linee (Perlin e Dean 1978), in cui le profondità per ciascun profilo sono rappresentate semplicemente da delle curve monotone decrescenti

allontanandosi dalla costa. Un'ulteriore innovazione è rappresentata dai modelli interamente in 3-D. In essi onde, correnti, trasporto di sedimenti e cambiamenti nella quota del fondale sono calcolati punto per punto, in piccole aree, definite da una griglia orizzontale disposta sulla zona di interesse.

I modelli numerici di cambiamento della linea di costa, come GENESIS, costituiscono una generalizzazione dei modelli analitici. Essi consentono il calcolo dell'evoluzione della linea di costa al variare di un ampio range di spiagge, strutture costiere, onde, condizioni iniziali ed al contorno, nello spazio e nel tempo.

In questi modelli la condizione semplificativa consiste nell'assumere che la forma del profilo della costa sia costante. Conseguentemente a questa assunzione, il movimento di qualsiasi profilo verso mare o verso terra può essere usato nella modellizzazione per rappresentare un cambiamento nella posizione della spiaggia. Per questo motivo questi sono spesso definiti come "one- contour line" model o semplicemente "one- line" model.

Il profilo della linea di costa nel modello è rappresentato dalla posizione media della stessa o da dati similari.

Nei modelli di cambiamento della linea di costa le condizioni principali che determinano le modificazioni nella spiaggia sono il trasporto di sedimento in direzione *longshore* e le condizioni al contorno, determinate dalle due estremità del sistema considerato nel modello.

Le fonti di sedimento (i ripascimenti ed i fiumi), le sue zone di accumulo (le insenature) e di prelievo possono essere considerate nel modello attraverso una descrizione analitica.

I modelli di cambiamento della linea di costa si sono dimostrati validi strumenti per la pianificazione nella gestione delle coste e di analisi della evoluzione temporale del bilancio dei sedimenti.

10.2 GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change

GENESIS è l'acronimo di *GENEralized Model for SImulating Shoreline Change* e come è già stato accennato, è un sistema di modellizzazione numerica utile per simulare i cambiamenti a lungo termine della linea di costa in relazione alle opere ingegneristiche che vi vengono costruite.

Tipicamente i modelli costruiti con questo software simulano dei sistemi costieri che hanno estensione variabile tra 1 e 100 km, mentre l'orizzonte temporale simulato varia tra 1 e 100 mesi (Hanson e Kraus, Tehnical Report CERC 89-19 1989).

GENESIS simula i cambiamenti della linea di costa indotti dalle differenze spaziali e temporali nel trasporto *longshore* dei sedimenti, così come quelli causati da ripascimenti ed input fluviale. Lo scopo principale del software è quello di studiare la risposta del sistema costiero alla costruzione di un'opera ingegneristica.

I cambiamenti della linea di costa dati dal trasporto *cross- shore* come quelli dovuti alle tempeste ed alle variazioni stagionali non possono essere simulati con questo modello. Questi processi vengono infatti assunti come ininfluenti, se la simulazione si estende per un intervallo temporale abbastanza lungo, o, se si è in presenza di un progetto molto recente, vengono considerati secondari e determinanti solo i rapidi cambiamenti della posizione della linea di costa, dovuti al raggiungimento della posizione di nuovo equilibrio mentre i cambiamenti a lungo termine sono legati alle alterazioni del trasporto *longshore*. In particolare GENESIS non può essere utilizzato nei casi in cui il cambiamento della spiaggia non è correlato alle strutture sulla costa, alle condizioni al contorno, o alle variazioni spaziali nel traporto *longshore* di sedimento indotto dalle onde. Esempi di questo tipo sono rappresentati dai sistemi dominati dalla marea, spiagge in cui le correnti sono causate dal vento, sistemi in cui il trasporto sedimentario prevalente è in direzione *cross- shore* ed è causato dalle mareggiate.

Il sistema di modellizzazione è generalizzato e permette la simulazione di una larga varietà di input di onde dal largo, configurazioni iniziali della spiaggia, strutture costiere e ripascimenti, specifici per ogni utente, per mezzo di un'interfaccia (Hanson e Kraus, Tehnical Report CERC 89-19 1989). Quest'ultima permette di utilizzare facilmente il software conoscendo solo le modalità operative dell'interfaccia, senza padroneggiare le strutture interne e gli algoritmi del codice del computer. Le istruzioni ed i dati, infatti, vengono inseriti tramite l'interfaccia che permette di calcolare il cambiamento della linea di costa.

In generale si possono avere tre diversi sistemi di inserimento dei dati all'interno di un programma:

- 1. metodo della manipolazione diretta (alterazione del codice sorgente);
- 2. metodo interattivo (attraverso screen prompts);
- 3. metodo dell'interfaccia (attraverso data file).

La manipolazione diretta non era un metodo che si poteva utilizzare con un modello vasto come GENESIS, perché richiede delle specifiche conoscenze dei linguaggi interni, c'è la possibilità di commettere errori nell'alterazione dei codici e si impiegano troppe risorse e tempo.

Il metodo interattivo è stato utilizzato in numerosi software commerciali, come l'Automated Coastal Engineering System, che è composto di moduli ciascuno con i relativi piccoli input di dati (Leenknecht e Szuwalski 1990). Tuttavia questo metodo venne inizialmente scartato come metodo principale per GENESIS, perché in questo modello si ha a che fare con una vasta numerosità di dati, e con questo procedimento si avrebbe molta difficoltà a trovare un errore

nelle procedure di inserimento. In un secondo tempo il metodo interattivo venne introdotto solo in alcune parti dell'inserimento dei dati in GENESIS.

GENESIS inoltre richiede l'inserimento di numerosi valori che non cambiano da un *run* ad un altro, come ad esempio la posizione della linea di costa, le condizioni delle onde al largo e la collocazione delle strutture.

Utilizzando il metodo dell'interfaccia vengono completamente eliminati l'alterazione accidentale del codice e la perdita di tempo nella compilazione del programma. Inoltre l'apporto di cambiamenti in alcune istruzioni o valori di dati non comporta un reinserimento di tutti i dati precedenti. Durante le fasi di verifica e controllo della bontà della simulazione vi possono essere numerosi piccoli cambiamenti ed i data files rappresentano un archivio dei diversi run.

10.2.1 Storia dello sviluppo di GENESIS

Prima dello sviluppo di GENESIS, ogni applicazione di modelli numerici per i cambiamenti della linea di costa richiedeva un'ingente modifica di modelli esistenti e, solitamente, anche l'aggiunta di particolari applicazioni. Veniva impiegato molto tempo per alterare le strutture interne dei modelli esistenti e per testare la bontà della simulazione. Dopo lo svolgimento di numerose esperienze di questo tipo si è pensato di combinare tutte le maggiori caratteristiche dei precedenti modelli sito- specifici in un unico modello generalizzato per il cambiamento della linea di costa.

L'ossatura di un modello unificato venne costruita da Hanson (1987, 1989) e si basava sul concetto delle "finestre di energia d'onda".

I modelli precedenti a GENESIS (N. C. Kraus 1988) sono stati sviluppati durante lo svolgimento dei progetti di *Nearshore Environment Research Center* condotti in Giappone (Horikawa e Hattori 1987). La struttura di GENESIS è stata sviluppata da Hanson (1987) in una ricerca congiunta dell'Università di Lund, Svezia e del *Coastal Engineering Reasearch Center* (CERC), *US Army Engineer Waterways Experiment Station*.

La descrione di GENESIS Versione 1 è stata fornita da Hanson (1987, 1989). Tuttavia GENESIS Versione 2, che rappresenta la prima pubblicazione in assoluto di questo modello, costituisce un sostanziale passo avanti rispetto alla precedente. Gli apporti maggiori furono:

- la trasmissione delle onde intercettate dai frangiflutti;
- la capacità di inserire sia un pennello che provoca diffrazione, sia uno che non lo provoca o un molo su un confine laterale;
- inclusione di un numero arbitrario di sorgenti di onde;
- miglioramento dell'interfaccia;

• inclusione di warning messages.

GENESIS Versione 2 è stato rilasciato la prima volta nel dicembre del 1989. La documentazione tecnica del modello, pubblicata contestualmente ad esso, è costituita dal Technical report CERC-89-19 (report 1) di Hanson e Kraus (1989). In Figura 52 viene riportata la tabella in cui Hanson e Kraus hanno delineato i punti di forza e di debolezza di GENESIS Versione 2.

Nel settembre del 1991 è stata rilasciata la Versione 2.5, con i programmi di supporto al sistema GENESIS. Questi ultimi sono utilizzati per automatizzare numerose attività di preparazione dei dati di input, necessari alla conduzione delle simulazioni usando il modello GENESIS. Inoltre i programmi di supporto permettono di standardizzare le procedure di analisi e le tecniche di accesso ai *data base* standardizzati, o ai dati ottenuti in output da altri modelli numerici (es: RCPWAVE), e generare dei risultati di analisi intermedi o flussi di dati costituenti input diretti per GENESIS (Gravens s.d.).

Major Capabilities and Limitations of GENESIS Version 2

<u>Capabilities</u>

Almost arbitrary numbers and combinations of groins, jetties, detached breakwaters, beach fills, and seawalls

Compound structures such as T-shaped, Y-shaped, and spur groins

Bypassing of sand around and transmission through groins and jetties

Diffraction at detached breakwaters, jetties, and groins

Coverage of wide spatial extent

Offshore input waves of arbitrary height, period, and direction

Multiple wave trains (as from independent wave generation sources)

Sand transport due to oblique wave incidence and longshore gradient in height

Limitations

No wave reflection from structures

No tombolo development (shoreline cannot touch a detached breakwater)

Minor restrictions on placement, shape, and orientation of structures

No direct provision for changing tide level

Wave transmission at detached breakwaters

Basic limitations of shoreline change modeling theory

Figura 52 maggiori capacità e limitazioni di GENESIS Versione 2 (Hanson e Kraus 1989)

Nell'agosto del 1992 è stato rilasciato un sistema integrato *menu driven*, conosciuto come *Shore*line *Modeling System* (SMS), che conteneva: i programmi di supporto al sistema GENESIS, i modelli numerici GENESIS e RCPWAVE ed i loro *model configuration data editors and graphics program*.

Lo sviluppo di GENESIS Versione 2.5, e successivamente Versione 3, è stato necessario per sopperire alle mancanze che sono emerse durante l'utilizzo del modello applicato a diversi contesti della costa.

Le principali innovazioni che sono state apportate nella Versione 3 del modello sono suddivisibili in quattro categorie fondamentali:

 nuovi algoritmi per la diffrazione delle onde e le differenti procedure per rendere nel modello l'effetto cumulativo di multiple sorgenti di onde che impattano sulla medesima linea di costa.

Il concetto delle finestre di energia delle onde è centrale in GENESIS e determina la sua struttura algoritmica. Esse descrivono le condizioni di frangimento delle onde lungo la costa ed il trasporto sedimentario che vi è associato. Inizialmente le condizioni di frangimento lungo la costa erano considerate individualmente per finestra di energia. Il cambiamento della costa era calcolato come somma di queste singole componenti. Tuttavia questo metodo è risultato poco realistico perché quando più finestre di energia influenzano il medesimo trasporto sedimentario, alcune onde posso trovarsi all'interno della zona di frangimento ed altre all'esterno.

La nuova procedura prevede il calcolo di un singolo campo di frangimento di onde basato sull'energia nell'intero modello prima dell'individuazione del tasso di trasporto sedimentario e del risultante cambiamento della linea di costa. Questo significa che, invece di sommare i tassi di trasporto sedimentario per un tratto di linea di costa influenzata da molteplici finestre di energia d'onda, prima viene calcolata la somma dei vari campi di frangimento d'onda (uno per ciascuna finestra di energia), e successivamente i tassi di trasporto sedimentario sono quantificati una volta sola. Quindi il cambiamento della linea di costa viene definito di conseguenza.

2. Introduzione di una condizione di mobilità della linea di costa;

la versione iniziale di GENESIS prevedeva per i confini laterali del sistema due sole condizioni: "pinned beach" e "gated".

In molte applicazioni del modello si possono indentificare porzioni della spiaggia che possono costituire i confini del sistema e che si muovono con un tasso quasi costante. In un caso del genere nessuna delle due condizioni previste dalla versione precedente di GENESIS risulta adeguata. Questo punto di debolezza del modello è stato superato generalizzando la condizione di confine "pinned beach": la vera e propria "pinned beach" è data da un confine mobile il cui tasso di movimento è nullo.

 Introduzione della possibilità di simulare il flusso di sedimento oltre il dominio del modello; questa facoltà è analoga all'inclusione di sorgenti o zone di prelievo puntuali o lineari di sedimento. In pratica questi elementi si riferiscono spesso al passaggio di sedimento. Nella nuova versione di GENESIS l'utente può inserire specifici punti o linee di prelievo o di immissione di sedimento, ovungue nel dominio del modello.

4. Introduzione di una migliore rappresentazione dei pennelli e dei moli;

GENESIS, fin dalle prime fasi di sviluppo, ha sempre permesso di rappresentare i pennelli ed i moli. Anche nelle versioni precedenti i cambiamenti della spiaggia sono stati simulati con successo in presenza di questi elementi, sia nel modello fisico che in campo. Tuttavia gli sviluppatori di GENESIS hanno ritenuto necessario migliorare la predizione del cambiamento della linea di costa in presenza queste strutture con particolare attenzione per i pennelli, i quali possono essere permeabili e allo stesso tempo provocare diffrazione. Il miglioramento introdotto riguardante i pennelli ha risposto essenzialmente a tre principali richieste: la prima era che il superamento dei pennelli da parte del sedimento dovesse essere visto come una risposta della linea di costa alla presenza degli stessi. Inoltre si necessitava che ad un aumento della lunghezza dei pennelli dovesse corrispondere una crescita dell'impatto sulla linea di costa. La seconda richiesta consisteva nella fatto che ad una differente permeabilità dei pennelli corrispondesse un diverso stato di equilibrio del sistema; ed, in particolare, ad un incremento delle permeabilità corrispondesse una diminuzione dell'impatto della struttura sulla linea di costa. La terza esigenza richiedeva che ad una permeabilità del pennello del 100% corrispondesse un comportamento della spiaggia analogo a come se la struttura fosse assente.

10.3 I modelli per il cambiamento della linea di costa come strumento per il processo di pianificazione

L'obiettivo della pianificazione nell'ambito dei problemi costieri è determinare la soluzione più efficace sia dal punto di vista ingegneristico, che dal punto di vista socioeconomico.

Il processo di pianificazione si compone di diverse fasi, che sono riportate nel diagramma di

Figura 53; i riquadri che riportano la scritta (MODEL) rappresentano le fasi in cui l'utilizzo si un modello per il cambiamento della linea di costa può assumere un ruolo importante e fornire un notevole aiuto.

<u>Fase (a)</u>: formulazione di un rapporto sul problema, identificazione dei vincoli del progetto, e sviluppo dei criteri per giudicare le prestazioni o lo scopo del progetto.

Queste operazioni comprendono diversi fattori e richiedono una pianificazione comprensiva e non di un singolo progetto. È infatti essenziale che il funzionamento di un progetto sia perfettamente correlato ai processi costieri regionali, al punto che si parla di "plan regional, engineer local" (piano regionale, opera ingegneristica locale) (Hanson e Kraus 1989).

Una chiara definizione dello stato del problema e dei criteri per giudicare il funzionamento del progetto sono essenziali per determinare oggettivamente il suo grado di fallimento o di successo dopo la sua esecuzione. Essi inoltre devono essere estremamente chiari, altrimenti il tempo che trascorre tra la pianificazione del progetto e la sua esecuzione potrebbe oscurare l'obiettivo originale e le caratteristiche del progetto potrebbero essere valutate esternamente al contesto. In caso di problemi posteriori all'esecuzione del progetto è importante poter distinguere tra il fallimento del progetto singolo ed il fallimento del processo di pianificazione.

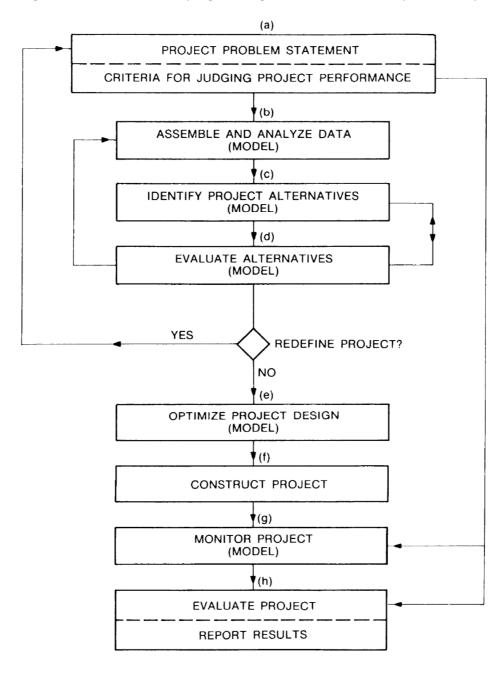


Figura 53 Principali fasi della pianificazione e dell'esecuzione di un progetto (Hanson e Kraus 1989)

Fase (b): Riunire ed analizzare i dati rilevanti.

Tutti i dati rilevanti devono essere riuniti ed analizzati, dal punto di vista dello stato del problema e della volontà di trovare un approccio risolutivo.

In questa fase la modellizzazione della linea di costa può essere utile nel fatto che, per essere attuata, essa richiede numerosi dati di diverso tipo; può quindi costituire una linea guida per la loro raccolta ed analisi in modo sistematico. Infatti, la maggior parte dei dati fisici necessari per valutare ed interpretare l'evoluzione della spiaggia e della linea di costa sono richiesti anche nella metodologia della modellizzazione. Ovviamente è possibile che siano necessari anche dati ulteriori, quindi la modellizzazione non può sostituire completamente l'esperienza sulla costa ed il processo non può dipendere completamente da essa.

Tuttavia anche i dati geologici ed i fattori regionali, come ad esempio i terremoti, la subsidenza e la struttura del fondale, possono entrare a far parte indirettamente del modello, così come i fattori ambientali (circolazione, caratteristiche delle masse d'acqua,...) e quelli biologici (habitat particolari,...). Quindi la raccolta dei dati per i modelli di cambiamento della linea di costa costituisce comunque una prima fase di scelta dei dati per il progetto organizzata e comprensiva.

Fase (c) e (d): Determinare e valutare le varie alternative del progetto.

Lo sviluppo di un progetto, partendo dall'identificazione del problema, attraverso la costruzione e la valutazione delle prestazioni, coinvolge cinque questioni fondamentali:

- fattibilità tecnica;
- giustificazione economica;
- fattibilità politica;
- accettabilità sociale;
- ammissibilità legale.

La fattibilità tecnica concerne l'entità di onde, correnti e trasporto di sedimenti che si manifestano nel sito d'interesse, la disponibilità del materiale di costruzione ed i potenziali vincoli nel disegno del progetto determinati da fattori esterni. Inoltre si considerano le limitazioni di accesso al sito e l'esperienza e la conoscenza dello staff.

La giustificazione economica concerne i potenziali benefici del progetto e ne costituisce solitamente la ragione primaria; essa include anche i finanziamenti per la pianificazione, per lo staff di progettazione , per la costruzione, manutenzione e monitoraggio. La giustificazione economica, la fattibilità politica, l'accettabilità sociale e l'ammissibilità legale sono strettamente correlati, dal momento che le autorità locali ed i governi centrali sono solitamente partner nei finanziamenti e nel iter autorizzativo dei progetti.

La valutazione delle diverse alternative implica la stima della fattibilità economica e tecnica per arrivare ad un'analisi costi- benefici.

Talvolta durante la fase di valutazione delle diverse alternative, con l'ausilio dell'insieme di dati raccolti al passaggio (b), emerge la necessità di ridefinire nuovamente lo stato del problema ed i criteri di giudizio, ad esempio a causa di effetti secondari a scala regionale che non erano stati evidenziati in precedenza.

Stabilito che il cambiamento della linea di costa di un sito può essere modellato, GENESIS è perfettamente adatto per una valutazione quantitativa e sistematica delle alternative. La modellizzazione del cambiamento della linea di costa permette, per ciascuna alternativa, la compilazione di una matrice di volumi di cambiamento della spiaggia in varie sezioni della costa, tramite la quale si possono classificare le diverse scelte tecniche. Al termine di questa fase viene scelta l'alternativa migliore.

Fase (e): ottimizzazione del disegno di progetto.

Una volta che è stata scelta la migliore alternativa per il progetto, è necessario ottimizzare il disegno, al fine di ottenere le migliori prestazioni con i costi più bassi. Questo obiettivo può essere perseguito anche con l'ausilio dei modelli di cambiamento della linea di costa che possono fornire dati quantitativi fondamentali.

Fase (f)e (g): costruzione e monitoraggio.

Dopo la costruzione, è necessaria un'attività di monitoraggio per verificare che siano stati perseguiti gli obiettivi tecnici che erano stati fissati in origine, per documentare ogni deviazione dal disegno e valutare la prestazione del progetto. È necessario formulare un piano di monitoraggio produttivo ed economico, in modo tale da verificare se sono stati raggiunti i propositi iniziali ed i criteri sviluppati nella fase (a). I risultati del progetto e l'elaborazione dei dati devono essere resi pubblici affinché possano essere riutilizzati per la valutazione e le ricerche di altri progetti.

I modelli di risposta della linea di costa possono costituire un aiuto fondamentale anche per costruire un piano di monitoraggio. Si possono infatti individuare, grazie ai modelli, le regioni in cui sono previsti i massimi e minimi cambiamenti della linea di costa e può essere valutata la sensitività. Il piano di monitoraggio può così basarsi su questi dati. Anche le frequenze di misurazione e la densità spaziale dei punti di monitoraggio possono essere stabiliti in riferimento al modello predittivo.

Concludendo si può affermare che grazie alla loro grande potenza e generalità, i modelli di simulazione numerica del cambiamento della linea di costa, come GENESIS, costituiscono una base per lo sviluppo dei problemi di protezione costiera e di formulazione delle possibili soluzioni, per l'organizzazione e l'analisi dei dati, e, più importante, per la valutazione delle

alternative e l'ottimizzazione di quella prescelta. I modelli numerici dell'evoluzione della spiaggia estendono l'esperienza sulla costa degli esperti ed introducono un metodo di gestione del progetto sistematico e comprensivo agli ingegneri locali ed alle autorità che devono pianificare. (Hanson e Kraus 1989).

10.4 Valutazione dei progetti e uso di GENESIS

10.4.1 Fase di *scoping* e fase di disegno

A seconda della fase progettuale in cui ci si trova, la quantità e qualità dei dati di cui si dispone per il modello e il livello di dettaglio richiesto, GENESIS può essere applicato su due differenti piani: la modalità *scoping* (analisi preliminare) e quella progettazione. La modellizzazione in modalità *scoping* richiede un input di dati minimo per caratterizzare il progetto e può essere utilizzata negli studi di ricognizione, per definire meglio l'inquadramento e per identificare le possibili alternative. L'applicazione della modalità *scoping* è uno studio di tipo schematico, in cui sono fatte numerosi semplificazioni. Il modello, infatti, in questi casi, rappresenta uno strumento esplorativo per ottenere delle stime dei relativi trend dei cambiamenti della linea di costa per differenti piani. I risultati ottenuti per le diverse alternative possono essere comparati a livello qualitativo senza riferirsi alle grandezze assolute. Quindi, sostanzialmente, la modalità *scoping* costituisce un primo tentativo di definizione del progetto ed una fase preliminare di indagine della soluzione.

La modalità progettazione, invece, rientra negli studi di fattibilità, dove è necessario che la modellizzazione raggiunga un notevole dettaglio. L'obiettivo di questa modalità è ottenere il corretto e reale cambiamento della linea di costa, così come l'entità e la direzione del tasso di trasporto di sedimenti *longshore*. La modalità progettazione procede sistematicamente attraverso la raccolta dati, il setup del modello, la taratura e la verifica, l'intenso lavoro di valutazione delle diverse alternative progettuali, per arrivare ad ottimizzare l'alternativa prescelta.

Quindi la modalità progettazione e quella di *scoping* perseguono obiettivi diversi. Lo *scoping* con GENESIS viene affrontato attraverso molteplici semplificazioni, non dovrebbe mai essere considerato un'alternativa alla modalità progettazione del modello ed i suoi risultati.

10.4.2 Dati di input

L'identificazione e la valutazione delle soluzioni alternative possono avere inizio solo dopo che è stato formulato una rapporto sul problema. Lo sviluppo di una soluzione, così come l'uso di GENESIS, sono basati su dati fisici e sulla quantificazione dei processi coinvolti. La necessità di

soddisfare la ricerca dei dati prima di applicare GENESIS rende sistematica la procedura di raccolta ed analisi degli stessi e costituisce un beneficio per tutte le altre fasi del progetto.

Ci sono numerosi tipi di dati che sono necessari per la valutazione del progetto: legali, finanziari, culturali, ambientali e fisici. Tuttavia nel presente lavoro saranno considerati solo i dati di natura fisica. I dati fisici sono richiesti per due motivi:

- per ottenere un background informativo, per creare una valutazione generale ed integrata dei processi costieri nel sito ed in tutta la regione geografica;
- per calibrare, verificare e fare delle predizioni su GENESIS.

Per quanto riguarda il primo punto è impossibile tracciare delle linee generali perché ogni sito, così come ogni progetto, ha le sue peculiarità. Per determinare i fattori speciali, fisici ed ambientali, che potrebbero influenzare la progettazione e le prestazioni sono necessarie l'ingegneria costiera e l'esperienza geologica.

Il primo passaggio tecnico per modellizzare è la scelta del sistema di coordinate per la linea di costa. L'andamento regionale viene definito da una carta a larga scala, mentre l'andamento locale è definito da una carta a piccola scala. L'andamento regionale viene utilizzato per identificare l'orientamento dei contorni al largo per modellizzare la rifrazione delle onde; mentre la posizione della linea di costa, la configurazione delle strutture ed altre informazioni specifiche del progetto sono riferite alla carta in piccola scala.

Viene determinato il trend della linea di costa e viene tracciato l'asse x parallelo a questo trend. Conseguentemente viene tracciato l'asse y perpendicolare all'asse x e quindi alla costa, come mostrato in Figura 54. Successivamente basandosi sulla qualità e sulla disponibilità dei dati, l'estensione del dominio del modello, il livello di dettaglio desiderato e la potenza disponibile, viene definita la griglia spaziale del modello.

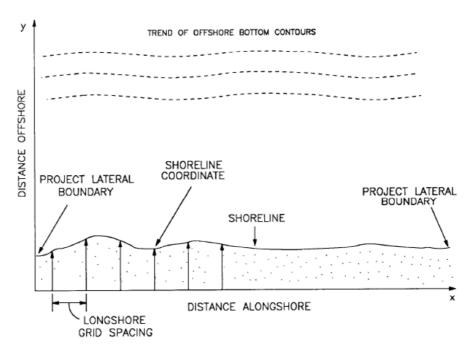


Figura 54 Sistema di coordinate del modello (Hanson e Kraus 1989)

Il sistema di coordinate e la griglia vengono stabiliti nei primi passaggi del progetto e tutte le informazioni geografiche successive, come la posizione della linea di costa, la collocazione di strutture, ripascimenti ed estuari dei fiumi, le batimetrie e le onde, devono essere riferiti al medesimo sistema di coordinate.

In Figura 55 sono riportati i dati che vengono richiesti nei modelli di cambiamento della linea di costa.

| Type of Data | Comments |
|---|---|
| Shoreline position | Shoreline position at regularly spaced intervals alongshore by which the historic trend of beach change can be determined. |
| Offshore waves | Time series or, at a minimum, statistical summaries of offshore wave height, period, and direction. |
| Beach profiles and offshore bathymetry | Profiles to determine the average shape of the beach. Bathymetry for transforming offshore wave characteristics to values in the nearshore. |
| Structures and other engineering activities | Location, configuration, and construction schedule of engineering structures (groins, jetties, detached breakwaters, harbor and port breakwaters, seawalls, etc.). Structure porosity, reflection, and transmission. Location, volume, and schedule of beach fills, dredging, and sand mining. Sand bypassing rates around jetties and breakwaters. |
| Regional transport | Identification of littoral cells and transport paths. Sediment budget. Locations of inlets. Wind-blown sand transport. |
| Regional geology | Sources and sinks of sediment (river discharges, cliff erosion, submarine canyons, etc.). Sedimentary structure. Grain size distribution (native and of beach fill). Regional trends in shoreline movement. Subsidence. Sea level change. |
| Water level | Tidal range. Tidal and other datums. |
| Extreme events | Large storms (waves, surge, failure of structures, etc.). Inlet opening or closing. Earthquakes. |
| Other | Wave shadowing by large land masses. Strong coastal currents. Ice. Water runoff. |

Figura 55 Dati richiesti nei modelli di cambiamento della linea di costa (Hanson e Kraus 1989)

Questa tabella può essere utilizzata anche come checklist per controllare di non tralasciare nulla nella raccolta di dati durante la fase iniziale del progetto. Tuttavia solo una piccola porzione dei dati elencati deve essere direttamente utilizzata in GENESIS. Le informazioni essenziali sono: la posizione della linea di costa, le onde, la configurazione delle strutture e delle altre attività ingegneristiche, il profilo della spiaggia e le condizioni al contorno. Gli altri dati che sono elencati in Figura 55 sono necessari per l'interpretazione del trasporto solido e del cambiamento della spiaggia.

Posizione della linea di costa

La posizione della linea di costa si ottiene attraverso dei rilievi del profilo o della linea di costa stessa, foto aeree, mappe e carte nautiche. La posizione della linea di costa deve essere riferita alla linea di base in direzione *longshore* ed i valori devono essere interpolati ai punti della griglia *longshore*, così da poter confrontare le posizioni della linea di costa calcolate con GENESIS. La terminologia "posizione della linea di costa" solitamente si riferisce alla batimetria

zero, rispetto ad un dato certo, ad esempio il livello medio del mare (MSL) o il *mean lower low* water (MLLW). Tutti i dati sulla posizione della linea di costa e sulla rifrazione delle onde devono riferirsi al medesimo dato.

I *plot* della posizioni della linea di costa e del cambiamento della spiaggia possono riportare errori. Quindi i rilievi per definire la taratura e gli intervalli di verifica devono essere effettuati nella stessa stagione, per minimizzare gli effetti dello spostamento ciclico stagionale della linea di costa.

Onde al largo

Raramente è possibile reperire dati misurati che sono adatti alla capacità di lavoro del modello. Se non sono disponibili dati misurati possono essere utilizzati dati *hindcast*, ovvero ottenuti tramite la ricostruzione del moto ondoso passato attraverso i dati pregressi del vento o delle onde. Per un basso livello di capacità di lavoro del modello possono essere utilizzati dei riassunti statistici *hindcast*.

Nelle serie temporali viene utilizzata l'altezza d'onda reale, mentre il periodo e la direzione vengono raggruppati in 50-100 categorie o in bande periodo-direzione, per limitare il numero di diversi calcoli di trasformazioni delle onde che devono essere effettuati.

Nella modalità scoping o quando le batimetriche sono parallele alla costa ed il modello ha estensione limitata, per la trasformazione delle onde è possibile utilizzare il modello interno a GENESIS. Esso trasforma l'onda dalla profondità del punto di misurazione, o di hindcast, a costa riproducendo lo schema delle onde che frangono lungo la costa ed il tasso di trasporto solido longshore. Se le batimetriche hanno andamento irregolare e l'estensione del progetto è considerevole, come nel caso esaminato nella presente tesi, è necessario utilizzare un programma specialistico per la trasformazione delle onde per propagare le onde da largo a costa, per poi inserirle successivamente in GENESIS. Nel caso della presente tesi è stato utilizzato un software NEMOS all'interno di CEDAS – Beach, ovvero l'STWAVE.

Il cambiamento della linea di costa è molto sensibile alla variazione della direzione delle onde e questa è la quantità più difficile da stimare. Se non fossero disponibili i dati di direzione delle onde possono essere utilizzati i dati anemometrici di vicine stazioni metereologiche, boe, stazioni di Guardia Costiera o aeroporti e può essere molto utile considerare le possibili aree di *fetch*. Devono, inoltre, essere considerati gli effetti dello strato limite costiero, dei trend del vento giornalieri e stagionali e delle tempeste.

Devono essere determinati anche l'intervallo di input delle onde (*time step*), le statistiche delle onde ed il periodo che deve essere coperto.

Nelle simulazioni che riguardano lunghi periodi e considerevoli estensioni spaziali, potrebbe essere impraticabile maneggiare dati di onde che ricoprano l'intero periodo di simulazione.

Infatti con GENESIS è possibile utilizzare dati di onde che riguardano periodi più brevi, che poi possono essere ripetuti fino ad arrivare all'estensione desiderata. Queste registrazioni più brevi vengono ottenute comparando le statistiche di tutti i data set delle onde (misurate o hindcasting) per anni, stagioni, e mesi. Le quantità tipiche che vengono preservate sono l'altezza significativa media ed il periodo, i loro valori massimi, la direzione media delle onde e la frequenza con cui si presentano tempeste.

Profili e batimetria

Nei modelli di rifrazione delle onde bisogna digitalizzare le batimetriche da carte idrografiche per ottenere una griglia numerica. Le informazioni ottenute dalle carte riguardo alle zone vicine alla costa possono poi essere comparate con i rilievi del profilo della spiaggia disponibili. I rilievi del profilo della spiaggia spesso si estendono ad una profondità nominale di 10 m, e quindi possono contenere delle informazioni supplementari a quelle delle carte.

Se gli intervalli di taratura e di verifica sono in un passato lontano (come nel diciannovesimo secolo), i dati batimetrici devono essere risalenti a quel periodo e non attuali.

In particolare i dati del profilo vengono utilizzati per stimare tre dati fondamentali che vengono utilizzati in GENESIS: l'altezza media della berma, la profondità di chiusura (ovvero il limite verso il mare entro il quale si ha significativo movimento di sedimenti) e la pendenza media del profilo.

Le batimetriche e i dati del profilo sono anche utilizzati per stabilire un bilancio sedimentario generale, per localizzare l'asportazione di materiale presso le strutture, per accennare i percorsi dei sedimenti ed i canali di scorrimento, per identificare le aree di deposizione ed erosione locali, per stimare qualitativamente e distinguere gli effetti del trasporto *longshore*, *cross- shore* e delle strutture in alcune situazioni.

Strutture ed altre attività ingegneristiche

Le strutture e le altre attività ingegneristiche, come i ripascimenti, devono essere correttamente collocate nel griglia sia spazialmente che temporalmente. GENESIS consente la rappresentazione del cambiamento delle strutture nel tempo, come per esempio l'estensione di pennelli o ripascimenti multipli. Conseguentemente, nella raccolta dei dati e nella pianificazione del progetto devono essere considerate le collocazioni, le configurazioni, le tempistiche e, nel caso di ripascimenti, dragaggi o prelievi, anche i volumi.

In alcune situazioni potrebbe essere necessario avere anche altri tipi di dati, alcuni dei quali sono difficili da quantificare, come ad esempio il fattore di permeabilità dei pennelli o il fattore di trasmissione dei frangiflutti, tuttavia è necessario effettuare delle stime di tali dati. Solitamente i valori finali di questi parametri incerti vengono determinati durante il processo di verifica.

Trasporto solido regionale

Il trasporto solido ed il cambiamento della linea di costa dovrebbero essere interpretati alla luce del contesto regionale in cui è inserito il sito; infatti potrebbero presentarsi degli effetti derivanti da processi abbastanza distanti da esso e viceversa. Se è possibile, il progetto deve essere pianificato nel contesto della unità fisiografica in cui si trova, essa è definita come un tratto di costa omogeneo ed indipendente per quanto riguarda i processi di erosione, trasporto e sedimentazione che hanno luogo al suo interno. L'unità fisiografica è delimitata da limiti morfologici che impediscono lo scambio di sedimenti con l'esterno. Quando non è possibile definire dei limiti di questo tipo, allora essi saranno rappresentati da zone per le quali si conoscono in modo approfondito i flussi di sedimenti.

Viene stabilito il bilancio sedimentario dell'unità fisiografica e questa analisi viene ripetuta per diversi livelli di dettaglio. Il primo semplice bilancio sedimentario, che può essere definito come una modellizzazione di primo ordine, fornisce una prospettiva integrata regionale dei processi dominanti e serve come guida interpretativa dei risultati quantitativi ed estensivi che derivano dalla successiva modellizzazione del cambiamento della linea di costa. In questa fase l'obiettivo è quello di stimare la direzione e la quantità di trasporto solido netto *longshore*, il trasporto sedimentario lordo, i trends nei cambiamenti della linea di costa, le variazioni stagionali nelle onde, nelle correnti, nel trasporto solido e nei cambiamenti della spiaggia.

Geologia regionale

La raccolta e l'analisi dei dati geologici e geomorfologici sono correlati allo studio dei processi di trasporto regionali nello sviluppo di un bilancio sedimentario.

I soggetti tipici della parte di studio sulla geologia regionale includono la stima degli effetti di insenature, come siti di prelievo o fonti di sedimento; scarichi fluviali; particolari fonti di materiale littorale, come le scogliere alte; l'innalzamento del livello del mare e la subsidenza; l'analisi granulometrica. Un importante elemento del background è rappresentato dalla storia geologica della costa, dal quando, perché e come si è formata.

Livello dell'acqua

Se l'escursione di marea è particolarmente ampia, la rifrazione delle onde ed il frangimento variano significativamente con il livello dell'acqua. Per le coste micro- e mesotidali l'uso di MSL o MLLW è considerato sufficiente. Se l'escursione di marea è notevole è necessario simulare la rifrazione con differenti livelli dell'acqua. Il livello dell'acqua è fondamentale anche per quanto riguarda l'overtopping e la trasmissione attraverso i frangiflutti, l'overtopping ed il passaggio di sedimenti attraverso i pennelli e l'interpretazione della posizione della linea di riva attraverso le foto aeree.

Eventi estremi

L'obiettivo della modellizzazione della linea di costa è simulare i cambiamenti a lungo termine nella posizione della linea di costa. Gli effetti degli eventi estremi sono contabilizzati nel processo di verifica. Un evento estremo è un processo naturale (tempeste di notevoli dimensioni), o un'attività ingegneristica, che causa un cambiamento sostanziale nella posizione della linea di costa. In questi casi la posizione della linea di costa non può essere interpretata senza la documentazione che riguarda questi eventi.

Altro

Ogni sito ha caratteristiche e problematiche proprie, quindi raramente è possibile applicare completamente la procedura standard senza nessuna modifica. L'esperienza sulla costa deve essere utilizzata per identificare delle caratteristiche del sito o dei fattori, che normalmente risultano minori, che possono essere per qualche ragione determinanti per i processi costieri del sito oggetto di studio.

10.4.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno devono essere specificate ad entrambi i limiti della griglia numerica. Infatti esse determinano il tasso con cui i sedimenti entrano ed escono dall'area modellizzata e possono avere profondi effetti sui cambiamenti della linea di costa.

Ci sono situazioni in cui è possibile eliminare gli effetti delle condizioni al contorno ponendo i limiti lontani dal progetto, soprattutto se esso è molto localizzato. In applicazioni più regionali bisogna obbligatoriamente considerare i problemi legati alle condizioni al contorno, talvolta accade che uno o entrambi i limiti siano addirittura una parte integrale del progetto.

Nelle situazioni dove le condizioni al contorno sono mal definite, ovvero la maggior parte delle applicazioni pratiche, è di grande aiuto osservare il tasso di trasporto solido, netto e lordo, calcolato da GENESIS oltre che il cambiamento della linea di costa. Le condizioni al contorno, infatti, determinano l'intensità del trasporto solido *longshore*. GENESIS fornisce informazioni sul tasso di trasporto calcolato in modo tale da poterlo comparare a quello determinato empiricamente o ai tassi che sono stati specificati attraverso delle assunzioni.

Come è stato già accennato, GENESIS permette due possibili rappresentazioni generali delle condizioni dei limiti chiamate "pinned" e "gated". Se la posizione della spiaggia può essere assunta come stazionaria, questa condizione definisce una pinned beach. Un limite di questo tipo è appropriato se il bilancio sedimentario è nullo agli estremi della spiaggia, quindi i sedimenti che escono dai confini sono in media annua gli stessi che entrano. Un confine del tipo "pinned beach" può essere imposto anche se la spiaggia è costretta, ad esempio da una scogliera o una barriera, ma i sedimenti possono ancora muoversi lungo la costa e dopo la linea di confine.

La condizione di limite "gated" descrive il caso in cui si hanno delle perdite o guadagni preferenziali di sedimento ai confini, in altre parole quando il confine influenza il tasso di trasporto.

10.4.4 Variabilità nei processi costieri

Problema della variabilità

Le onde portano verso costa una grande quantità di energia, che viene poi dissipata attraverso il frangimento, la generazione di correnti, i cambiamenti nel livello dell'acqua, i movimenti di sedimento, la turbolenza ed il calore. Le onde incidenti variano nello spazio e nel tempo, inoltre le loro proprietà cambiano durante il loro moto sul fondale marino. Le spiagge sono formate da sedimenti di varie forme e granulometrie che si muovono lungo o attraverso la costa secondo leggi che non sono del tutto chiare. Questi sedimenti infatti sono trasportati da complesse circolazioni tridimensionali, di varie scale spaziali e temporali, e diversi gradi di turbolenza. Anche tra la spiaggia e la zona retrospiaggia ci sono molte proprietà tessiturali che variano spazialmente e nel tempo.

Alla luce della profonda variabilità che caratterizza i processi costieri, è chiaro che un'unica risposta fornita da modello di simulazione debba essere ritenuta un risultato rappresentativo che deriva dall'approssimazione di molte incertezze e condizioni fortemente variabili.

Allo stesso modo nell'utilizzo di questi modelli in chiave predittiva, i fattori responsabili per il cambiamento della spiaggia, in primo luogo le onde, non sono noti. Viene predetta una serie temporale di altezze d'onda, periodi e direzioni che deve essere considerata come uno dei possibili climi d'onda che possono verificarsi.

Quantificazione della variabilità

Dal momento che esiste un'enorme variabilità nei sistemi costieri qualsiasi predizione del cambiamento della linea di costa non costituisce una risposta corretta.

Una procedura che è stata messa a punto al CERC, per ovviare parzialmente all'incertezza che caratterizza le onde, consiste nel calcolare la deviazione standard dell'altezza d'onda e della direzione delle serie temporali in input e correggere i valori delle onde in ingresso in base a dei range definiti da queste deviazioni. GENESIS permette delle correzioni dell'altezza d'onda e della direzione che possono essere definite dall'utente. Il periodo normalmente non è variato, ma in certe applicazioni, come quelle in cui sono coinvolte onde con periodo lungo o mari con fondali molto irregolari, il profilo di frangimento è particolarmente sensibile al periodo d'onda. Un'altra procedura prevede l'utilizzo di differenti serie temporali di dati hindcasting, se disponibili. Variando l'altezza d'onda e la direzione delle onde in input entro un ragionevole

intervallo fisico, si ottiene una serie di predizioni del cambiamento della linea di costa, in cui si trova anche il cambiamento attuale.

Taratura e verifica

Per taratura del modello si intende la procedura nella quale con il modello si riproducono i cambiamenti nella posizione della linea di costa che sono stati misurati in un intervallo noto di tempo.

Per verifica di un modello si intende la procedura di applicazione del modello tarato per riprodurre i cambiamenti misurati in un intervallo di tempo diverso da quello di taratura.

Il successo della procedura di verifica indica che le predizioni del modello sono indipendenti dall'intervallo di taratura, ma non garantisce l'indipendenza in generale, visto che le condizioni possono facilmente cambiare ed annullare la verifica.

Colui che costruisce, o semplicemente usa, un modello deve prestare attenzione ai cambiamenti significativi della situazione fisica attuale, che possono invalidare la procedura di verifica originale e richiederne una nuova.

Inoltre alcuni data set di onde possono meglio rappresentare il clima d'onde che è stato utilizzato durante la taratura e la verifica rispetto ad altri.

In pratica spesso mancano i *data set* sufficientemente completi per fornire un'adeguata taratura e verifica. Questo aumenta l'incertezza nel processo di modellizzazione e riduce l'affidabilità dei calcoli. In assenza di dati concreti, stimare il cambiamento della linea di costa con il modello può rappresentare l'unica informazione di natura quantitativa e sistematica utile al processo di pianificazione. In situazioni in cui i dati sono mancanti, l'esperienza sulla costa e con GENESIS sono fondamentali per fornire stime ragionevoli di parametri in input o per interpretare correttamente i risultati.

Le predizioni dei modelli sono prontamente confrontate con i mezzi grafici. Vengono creati dei plot di posizioni della linea di costa calcolate e misurate, normalmente ad una scala verticale esagerata. La posizione della linea di costa può anche essere rimaneggiata matematicamente, ad esempio con il metodo di regressione ai minimi quadrati, per determinare la combinazione di parametri che produce la migliore coincidenza con le misure calcolate e quelle rilevate. Questo fornisce una misurazione oggettiva della bontà dell'andamento, dove l'ispezione visiva è soggettiva. Tuttavia bisogna sempre controllare il tutto anche visivamente perché c'è sempre la possibilità di compiere errori che possono essere facilmente individuati con l'ispezione visiva.

Test di sensitività

Il test di sensitività si riferisce al processo di esame dei cambiamenti negli output forniti da un modello risultanti da cambiamenti intenzionali degli input. Se un piccolo cambiamento ne produce uno grande, i risultati calcolati attraverso quel modello dipendono fortemente dalla qualità della verifica, che nelle applicazioni è sempre caratterizzata da un certo livello di dubbio.

Una seconda ragione per condurre un test di sensitività concerne la variabilità che caratterizza i sistemi costieri. Nessuna predizione fornita da un modello può essere considerata la risposta, bisognerebbe effettuare una serie di predizioni, e con giudizio scegliere il risultato più probabile o ragionevole. Se il modello è molto sensibile ai piccoli cambiamenti dei valori in input, l'intervallo di predizione è troppo ampio e, in sostanza, non apporta informazioni. L'esperienza ha dimostrato che GENESIS è solitamente insensibile ai piccoli cambiamenti nei valori dei parametri. Tuttavia è bene effettuare sempre il test di sensitività.

Interpretazione dei risultati

Bisognerebbe sempre verificare la ragionevolezza generale dei risultati. A questo proposito, devono essere effettuate delle panoramiche sui processi costieri locali e regionali ed un calcolo del bilancio sedimentario oppure una modellizzazione di primo ordine per giudicare i risultati del modello.

L'esperienza maturata durante le fasi di verifica, analisi di sensitività e modellizzazione delle alternative al progetto aiutano molto nell'identificare risultati scorretti o fuorvianti. Gli errori più grossolani vengono evidenziati attraverso la rappresentazione del cambiamento della linea di costa, errori più sottili vengono rilevati con il test di sensitività, attraverso la comprensione delle dipendenze di base dei cambiamenti della linea di costa dalle onde in input e dalle condizioni al contorno.

Il cambiamento della linea di costa è determinato da processi non lineari, molti dei quali sono rappresentati in GENESIS. Le configurazioni di spiagge complesse, e onde in input dipendenti dal tempo, producono risultati che non possono essere estrapolati dall'esperienza. Tuttavia l'esperienza deve essere considerata il più possibile nella valutazione della correttezza dei risultati e per comprendere gli andamenti dei cambiamenti della linea di costa prodotti.

Infine, l'utente deve sempre mantenere una certa distanza dai risultati del modello: deve sempre essere ricordato che le onde incidenti in modo obliquo non sono responsabili di tutti i trasporti solidi *longshore* ed i cambiamenti della linea di costa. Potenziali errori possono provenire anche dall'*hindcast* delle onde incidenti, nel rappresentare un campo di onde irregolari con onde monocromatiche e, talvolta, da attività umane non documentate o eventi straordinari che hanno comportato un cambiamento della spiaggia.

Quando si interpreta un modello è inoltre necessario considerare il probabile intervallo di variabilità dei processi costieri (Hanson e Kraus 1989).

11Teoria della modellazione dell'evoluzione della linea di riva e GENESIS

11.1 Assunzioni di base di un modello di cambiamento della linea di costa

Un'osservazione comune che può essere fatta è che il profilo della spiaggia mantiene una forma media che è caratteristica della costa, salvo cambiamenti particolari dovuti agli eventi di tempesta. Parlando ovviamente in senso comparativo e a lungo termine, si può affermare che le spiagge ripide solitamente rimangano tali, così come quelle dal profilo dolce. Nonostante i cambiamenti stagionali del clima meteomarino causino spostamenti della posizione della linea di costa e cambiamenti nella forma e nella pendenza media della spiaggia, la deviazione dalla pendenza media della spiaggia su tutto il profilo attivo è relativamente piccola.

Pelnard e Considere nel 1956 formularono una teoria matematica sulla risposta della linea di costa all'azione delle onde assumendo che la spiaggia si muova parallelamente a se stessa, ovvero che trasli verso mare e verso terra senza cambiare forma nel corso dell'accrescimento e dell'erosione. Quindi se il profilo non subisce variazioni, un punto qualsiasi sulla linea di riva è sufficiente per indicare la sua evoluzione rispetto alla posizione di partenza. Così una sola linea di contorno può essere utilizzata per descrivere il cambiamento nella forma in piano della spiaggia e del suo volume in seguito ad accrescimento o erosione, da cui deriva la dicitura "one – contour line model" o "one - line model".

Una seconda assunzione di natura geometrica consiste nel fatto che il sedimento venga trasportato in lungo costa tra due limiti ben definiti nel profilo. Il limite diretto verso riva è collocato sulla cima della berma attiva, quello diretto verso il mare è collocato presso la profondità di chiusura.

Inoltre, per le spiagge aperte, il tasso di trasporto solido è funzione dell'altezza d'onda al frangimento e della direzione lungo la costa. Poiché il tasso di trasporto solido è parametrizzato in termini quantitativi delle onde al frangimento, la struttura dettagliata della corrente sotto costa non influisce direttamente.

Infine si assume che ci sia un trend evidente nel comportamento della linea di costa, che viene individuato come un segnale costante nel cambiamento della linea di costa in mezzo a tutti i "rumori di fondo" del sistema di spiaggia, determinati da tempeste, cambiamenti stagionali,

fluttuazioni di marea ed altri processi ciclici e random. Sostanzialmente questa assunzione implica che l'azione delle onde, il conseguente trasporto *longshore* e le condizioni al contorno siano i maggiori fattori che controllano il cambiamento della spiaggia a lungo termine. Questa assunzione è di solito soddisfacente nel caso di progetti ingegneristici che includono pennelli, barriere, moli e muri radenti.

Riassumendo le assunzioni standard dei modelli di cambiamento della linea di costa sono:

- il profilo della spiaggia è costante;
- i limiti verso mare e verso costa sono costanti;
- il sedimento è trasportato lungo la spiaggia dall'azione delle onde al frangimento;
- la struttura dettagliata della corrente sotto costa è ignorata;
- c'è un trend a lungo termine nell'evoluzione della linea di costa.

Queste assunzioni permettono di ottenere un modello flessibile ed economico applicabile ad una vasta gamma di situazioni di ingegneria costiera. Ovviamente è importante ricordare che queste assunzioni costituiscono un'idealizzazione di un sistema complesso e quindi hanno delle limitazioni. Ad esempio l'assunzione che il profilo si muova parallelamente a se stesso è violato quando si hanno strutture vicine. La profondità di chiusura e l'altezza della berma variano lungo la spiaggia, ma nel modello vengono considerate costanti; pertanto i valori che vengono inseriti nel modello devono essere attentamente valutati. Inoltre il tasso di trasporto solido che viene considerato in GENESIS dipende unicamente dalle onde incidenti e non vengono considerati le correnti di marea, i venti o altri agenti forzanti; quindi tale software non può essere utilizzato nei casi in cui le onde incidenti non costituiscano gli unici fattori determinanti. GENESIS non è utilizzabile per descrivere il trasporto che avviene in direzione cross – shore, come le correnti di undertow, le rip currents o altri trasporti o movimenti in 3d. L'assunzione che ci sia un trend a lungo termine nell'evoluzione della spiaggia significa che le condizioni al contorno o altri processi sistematici, come la presenza dello sbocco di un fiume, o un cambiamento regolare nella propagazione ondosa, come nel caso dell'inserimento di una barriera, siano dominanti nel cambiamento della linea di riva. Questo normalmente è la condizione che si verifica dopo l'installazione di opere ingegneristiche per la protezione della costa.

11.2 Equazioni che governano il cambiamento della linea di costa

Le equazioni che governano il cambiamento della linea di costa si basano sulla conservazione del volume di sedimento. Si considera un sistema di assi cartesiani in cui l'asse y si estende in direzione *offshore* e l'asse x è parallelo all'andamento della costa. la quantità y rappresenta la posizione della costa, e x la distanza in direzione *longshore* (Figura 56 e Figura 57).

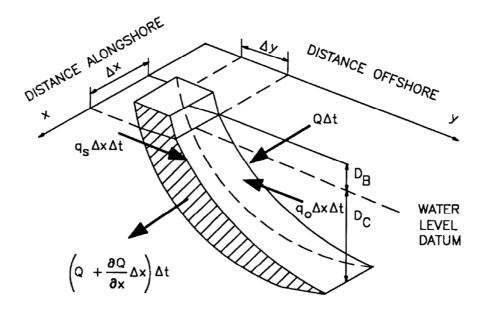


Figura 56 Visione della sezione di una cella e del relativo cambiamento del volume di sedimento che contiene (Hanson e Kraus 1989)

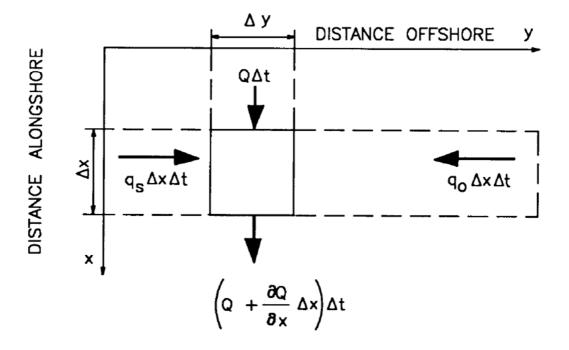


Figura 57 Visione in piano di una cella e del relativo cambiamento del volume di sedimento che contiene (Hanson e Kraus 1989)

Si assume che, quando una data quantità di sedimento entra o esce dalla sezione durante un intervallo temporale Δt , il profilo della spiaggia trasli verso mare o verso terra lungo una sezione di costa senza cambiare forma. Il cambiamento nella posizione della linea di riva è

rappresentato da Δy , la lunghezza del segmento della linea di costa è dato da Δx , ed il profilo si muove con un'estensione verticale data dall'elevazione della berma D_B e dalla profondità di chiusura D_C , entrambi misurate rispetto ad un dato di riferimento verticale, ad esempio MSL o MLLW.

Quindi il cambiamento del volume nella sezione è determinato dall'Equazione 35 ed è determinato dalla quantità netta di sedimento che entra o esce dalla sezione dai suoi quattro limiti.

$$\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C)$$

Equazione 35

Il cambiamento di volume risulta se esiste una differenza ΔQ nel tasso di trasporto *longshore* ai due limiti laterali della cella. Questo cambiamento di volume netto è rappresentato dall'Equazione 36

$$\Delta Q \Delta t = \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) \Delta x \Delta t$$

Equazione 36

Un altro contributo può derivare da una *source* o un *sink* lineare di sedimento, rappresentabile con l'Equazione 37, che aggiunge o rimuove un volume di sedimento per unità di larghezza della spiaggia, sia dal lato verso il mare aperto, q_0 , che dal lato verso terra, q_s .

$$q = q_s + q_o$$

Equazione 37

Questo produce un cambiamento di volume pari a $q\Delta x\Delta t$. Sommando i diversi contributi e uguagliandoli al cambiamento di volume si ottiene l'Equazione 38:

$$\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C) = \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) \Delta x \Delta t + q \Delta x \Delta t$$

Equazione 38

Riarrangiando i termini e ponendo il limite $\Delta t \rightarrow 0$ si ottiene l'Equazione 39 che rappresenta l'equazione generale che governa il tasso di cambiamento della linea di costa.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_R + D_C)} \left[\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right] = 0$$

Equazione 39 Equazione generale che governa il cambiamento della posizione della linea di riva

Per risolvere l'Equazione 39 bisogna che vengano forniti diversi dati: la posizione iniziale della linea di riva in tutto il dominio, le condizioni al contorno su tutti i limiti della spiaggia ed i valori di Q, q, D_B e D_C .

11.3 Tasso di trasporto solido

Trasporto solido in direzione longshore

La formula empirica che viene utilizzata da GENESIS per il trasporto solido in direzione longshore è rappresentata dall'Equazione 40:

$$Q = (H^2 C_g)_b \left[a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos \theta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_b$$

Equazione 40 Formula empirica del trasporto solido in direzione longshore

Dove:

H rappresenta l'altezza d'onda;

C_g è la velocità di gruppo delle onde;

b in pedice significa che è un dato riferito alla condizione di frangimento

 θ_{bs} è l'angolo al frangimento delle onde nella linea di riva locale.

I parametri adimensionali a_1 e a_2 sono dati rispettivamente dall'Equazione 41 e dall'Equazione 42.

$$a_1 = \frac{K_1}{16(\rho_s/\rho - 1)(1 - p)(1.416)^{5/2}}$$

Equazione 41 Parametro a₁

$$a_2 = \frac{K_2}{8(\rho_s/\rho - 1)(1 - p)\tan\beta(1.416)^{5/2}}$$

Equazione 42 Parametro a₂

Dove:

K₁, K₂ sono coefficienti empirici, che vengono trattati come parametri di calibrazione;

ρ_s è la densità del sedimento (si considera 2.65 10³ kg/m³ per la sabbia quarzosa);

ρ è la densità dell'acqua (si considera 1.03 10³ kg/m³ per l'acqua di mare);

p è la porosità della sabbia sul fondo (si considera solitamente 0.4);

tanβ è la pendenza media del fondo dalla linea di riva alla profondità di chiusura.

Il fattore 1.416 viene utilizzato per convertire l'altezza significativa delle onde, ovvero l'altezza statistica che richiede GENESIS, nel suo valore quadratico medio.

Il primo termine dell'Equazione 40 corrisponde alla formula del CERC (Shore Protection Manual. 1984) e rappresenta il trasporto solido *longshore* prodotto dalle onde incidenti non perpendicolari alla costa.

La prima stima del valore di K_1 presente in letteratura è stata effettuata da Komar e Inman nel 1970 con l'impiego di sedimenti traccianti e utilizzando l'altezza quadratica media come valore di riferimento, tale valore ammonta a 0.77.

Kraus, et al. nel 1982 hanno modificato tale valore abbassandolo a 0.58, basandosi sui loro esperimenti con i traccianti. Questo valore viene utilizzato in letteratura, se si converte l'altezza significativa nel suo valore quadratico medio con il fattore 0.416, per comparare i valori di K_1 determinati dalla calibrazione del modello. Il valore assegnato a K1 tipicamente varia tra 0.58 e 0.77.

Il secondo termine dell'Equazione 40 non fa parte della formula del CERC ed è utilizzato per descrivere l'effetto di altri meccanismi di generazione del trasporto solido in direzione longshore, il gradiente longshore per l'altezza d'onda al frangimento è pari a $\partial H_b/\partial x$. Questo contributo al tasso di trasporto solido è stato introdotto da Ozasa e Brampton nel 1980. Nelle spiagge aperte il contributo fornito dal gradiente longshore nell'altezza d'onda è solitamente molto più piccolo di quello derivante dalle onde oblique incidenti. Tuttavia, nella vicinanza delle strutture, dove la diffrazione provoca una sostanziale differenza nell'altezza d'onda al frangimento per una determinata lunghezza della spiaggia, l'inclusione del secondo termine conduce a dei risultati migliori, considerando anche la corrente dovuta alla diffrazione (N. C. Kraus 1983, Kraus e Harikai 1983, Mimura, Shimizu e Horikawa 1983).

Benché K₁ e K₂ siano stati stimati empiricamente questi coefficienti sono trattati come parametri di calibrazione del modello e sono definiti come "parametri del trasporto".

Il parametro di trasporto K_1 determina la scala temporale del cambiamento della linea di costa simulata, così come l'importanza del tasso di trasporto solido in direzione *longshore*. Questi fattori vengono controllati di concerto con il fattore $1/(D_B + D_C)$ che si trova nell'Equazione 39. Il valore K_2 varia tipicamente tra 0.5 e 1.0 volte K_1 . K_2 non dovrebbe essere più alto di $1.0K_1$, perché altrimenti il cambiamento della linea di riva calcolato potrebbe risultare esagerato nella vicinanza delle strutture e si potrebbe andare incontro ad instabilità numerica.

Concludendo, K1 e K2, a causa delle diverse assunzioni ed approssimazioni che vengono effettuate nella modellazione, sono trattati come parametri di calibrazione. Il loro valore viene determinato riproducendo il cambiamento della linea di costa misurata, la grandezza e la direzione del trasporto solido.

Source e sink

Il termine q che compare nell'Equazione 39 rappresenta una *source* o un *sink* lineare del sedimento nel sistema. *Sources* tipiche sono i fiumi e le scogliere, e tipici *sinks* sono le insenature e le entrate dei canali. Il sedimento trasportato dal vento presso la riva può costituire sia una *source* che un *sink*, a seconda della direzione in cui soffia il vento. Non si hanno formule predittive generali per q_s e q_o , i cui valori dipendono dalle singoli situazioni. Queste quantità tipicamente variano nel tempo e sono funzioni della distanza lungo la spiaggia. La Versione 2 di GENESIS non fornisce la possibilità di rappresentare *sink* e *source*.

Tuttavia essi possono essere introdotti come ripascimenti o prelievi di sedimento dalla spiaggia.

Cambiamento diretto nella posizione della spiaggia

La posizione della spiaggia può anche essere cambiata direttamente, ad esempio, come risultato di un ripascimento o di un dragaggio. In casi di questo tipo, il profilo viene traslato verso mare o verso terra, a seconda dell'esigenza, di una quantità definita che può essere funzione del tempo e della distanza *longshore*. GENESIS permette di specificare i cambiamenti diretti della posizione della linea di riva, che possono essere negativi (verso terra), ad esempio in caso di prelievo del sedimento o positivi (verso mare), ad esempio nel caso di un ripascimento.

11.4 Parametri empirici

Profondità del trasporto longshore

La larghezza del profilo lungo il quale ha luogo il trasporto *longshore* sotto un dato set di moto ondoso è necessaria per stimare la quantità di sedimento, come percentuale del totale, che passa aldilà di moli o pennelli che si trovano nel sistema. Poiché la maggior parte del movimento del sedimento si svolge nella surf zone, questa distanza è approssimativamente uguale all'ampiezza della *surf zone* stessa, la quale dipende dalle onde incidenti, principalmente dalla loro altezza al frangimento.

In GENESIS l'algoritmo di movimento del sedimento aldilà di un ostacolo, ad esempio un pennello, richiede una profondità attiva di trasporto *longshore*, che è direttamente correlata alla larghezza della *surf zone*, se si assume che il profilo cresca monotonicamente in funzione della distanza *offshore*. Nella Versione 2 di GENESIS viene definita una quantità detta "profondità del trasporto attivo *longshore*" D_{LT}, che viene settata pari alla profondità della di frangimento del 10% delle onde più alte. Considerando una situazione standard, questa profondità e correlata all'altezza significativa H_{1/3} attraverso l'Equazione 43

$$D_{LT} = \frac{1.27}{\gamma} \left(H_{1/3} \right)_b$$

Equazione 43 Profondità del trasporto attivo longshore

Dove:

1.27 è il fattore di conversione tra l'altezza d'onda del 10% delle onde più alte e l'altezza significativa;

γ è l'indice di frangimento, ovvero il rapporto dell'altezza d'onda e della profondità al frangimento;

 $(H_{1/3})_b$ è l'altezza d'onda significativa al frangimento.

Se nell'Equazione 43 γ =0.78 allora $D_{LT}\approx 1.6(H_{1/3})_b$. La profondità che definisce l'estensione verso mare della zona del trasporto attivo D_{LT} è molto minore della profondità di chiusura D_C , eccetto che per condizioni di onde estreme.

GENESIS usa anche un'altra profondità caratteristica, definita "massima profondità del trasporto *longshore*", D_{LTo} , per calcolare la pendenza media della spiaggia $tan\beta$ che appare nell'Equazione 42. La quantità D_{LTo} si calcola con l'Equazione 44.

$$D_{LTo} = (2.3 - 10.9H_0) \frac{H_0}{L_0}$$

Equazione 44 Massima profondità del trasporto longshore

Dove:

H_o/L_o è la ripidità dell'onda in acque profonde;

Ho è l'altezza significativa in acque profonde;

Lo è la lunghezza d'onda in acque profonde.

La lunghezza d'onda nelle acque profonde è calcolata attraverso la teoria lineare delle onde come mostrato nell'Equazione 45:

$$L_O = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Equazione 45 Lunghezza d'onda in acque profonde

Dove:

g è l'accelerazione gravitazionale;

Tè il periodo d'onda.

Se sono fornite informazioni spettrali riguardo alle onde, T è dato dal periodo di picco; altrimenti, esso è il periodo associato all'onda significativa.

L'Equazione 44 è stata introdotta da Hallermeier nel 1983 per stimare approssimativamente una profondità limite annuale della zona litorale in condizioni di onde estreme.

In GENESIS D_{LTo} è calcolata ad ogni time step a partire dai dati delle acque profonde e si assume che esso sia valido per l'intera estensione in direzione *longshore* del dominio del modello.

Poiché le caratteristiche delle onde variano stagionalmente, questa definizione della profondità massima del trasporto *longshore* riflette i cambiamenti nella forma media del profilo e della pendenza media della spiaggia.

Forma del profilo e pendenza medie della spiaggia

L'equazione di cambiamento della linea di riva non richiede delle specifiche riguardo alla forma del fondo, dal momento che il profilo si muove parallelo a se stesso. Tuttavia, per determinare la locazione delle onde al frangimento lungo la spiaggia e per calcolare la pendenza media nelle vicinanze della riva utilizzata nell'Equazione 40 Formula empirica del trasporto solido in direzione *longshore*, deve essere specificata una forma del profilo. Per tale proposito viene utilizzata la forma del profilo all'equilibrio dedotta da Bruun (1954) e da Dean (1977). Loro dimostrarono che la forma media del profilo per una larga varietà di spiagge può essere in generale rappresentata da una semplice funzione matematica riportata in Equazione 46.

$$D = A \gamma^{2/3}$$

Equazione 46 Modello del profilo di Dean (1977)

Dove:

D è la profondità;

A è un parametro empirico.

Il parametro di scala A dipende dalla granulometria che caratterizza il sedimento della spiaggia (Moore 1982). Per l'uso in GENESIS, la curva di A disegnata da Moore è approssimata da una serie di linee date come funzione dalla granulometria mediana della spiaggia vicino alla riva d_{50} , espressa in mm ed A espressa in $m^{1/3}$:

| $A=0.41 (d_{50})^{0.94}$ | d_{50} < 0.4 |
|--------------------------|--------------------------|
| $A=0.23 (d_{50})^{0.32}$ | $0.4 \le d_{50} < 10.0$ |
| $A=0.23 (d_{50})^{0.28}$ | $10.0 \le d_{50} < 40.0$ |
| $A=0.46 (d_{50})^{0.11}$ | $40.0 \le d_{50}$ |

Se sono presenti studi geologici sulla spiaggia oggetto di studio si può utilizzare lo schema riportano in Figura 58 in per individuare la granulometria mediana. Questo valore fornito a GENESIS permetterà al software di ricavare un valore di A che darà il profilo maggiormente rappresentativo della spiaggia. Se non ci sono studi ed i dati sono mancanti si utilizza la granulometria mediana della *surf zone*.

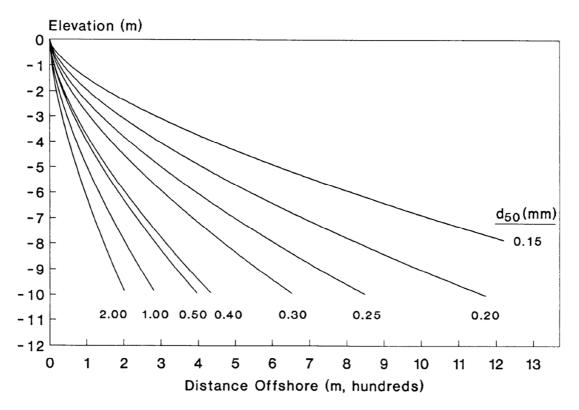


Figura 58 Schema per determinare l'effettiva granulometria della spiaggia (Hanson e Kraus 1989)

La pendenza media della spiaggia in prossimità della riva $\tan\beta$ per il profilo di equilibrio definito dall'Equazione 46 è calcolata come il valore medio dell'integrale della pendenza $\partial D/\partial y$ da 0 a y_{LT} , da cui risulta l'Equazione 47:

$$\tan \beta = A(y_{LT})^{-1/3}$$
 Equazione 47

Dove:

 y_{LT} è la larghezza della zona litorale, che si estende verso mare sino alla profondità D_{LTo} . Poiché per definizione si ha l'Equazione 48

$$y_{LT} = (D_{LTo}/A)^{3/2}$$
Equazione 48

la pendenza media è calcolata nell'Equazione 49

$$\tan \beta = \left[\frac{A^3}{D_{LTo}}\right]^{1/2}$$

Equazione 49 Pendenza media della spiaggia

Profondità di chiusura

La profondità di chiusura è un parametro difficile da quantificare. Empiricamente la locazione del profilo di chiusura D_{C} non può essere identificato con precisione, poiché i piccoli cambiamenti batimetrici nelle acque più profonde sono estremamente difficili da misurare. Questa situazione solitamente implica l'espressione della profondità di chiusura sotto forma di

un vasto range di valori, che richiedono numerosi ragionamenti per ricavarne un singolo valore. Spesso gli studi sul profilo non sono disponibili a profondità sufficienti e con sufficiente controllo verticale ed orizzontale per permettere di fare confronti tra i profili.

Alternativamente la profondità di chiusura può essere stimata riferendosi alla massima altezza d'onda annuale o stagionale. Hallermeier (1983) scoprì che il massimo limite della zona litorale verso il mare aperto può essere espresso attraverso l'Equazione 44 se l'altezza d'onda ed il periodo sono dati dai valori medi delle onde singificative più alte che si verificano per 12 ore durante l'anno.

Per inserire in GENESIS un valore di profondità di chiusura abbastanza soddisfacente è necessario che si utilizzino sia gli studi sulla batimetria e sul profilo che l'Equazione 44, in modo tale da poter controllare la bontà dei valori ottenuti.

Nelle coste esposte al mare aperto, la profondità di chiusura normalmente non mostra variazioni significative in direzione *longshore*, ammesso che il clima ondoso e le caratteristiche del sedimento risultino omogenee. Tuttavia, sottoflutto rispetto a grandi strutture, come i lunghi moli dei porti, il clima ondoso è più mite e la profondità di chiusura dovrebbe essere inferiore. In GENESIS questo effetto non viene considerato perché viene utilizzata una profondità di chiusura media valida per tutto il dominio.

11.5 Calcolo del moto ondoso

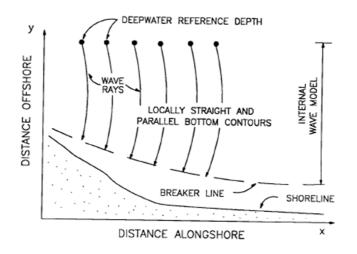
Le informazioni riguardanti il moto ondoso a largo possono essere ottenute sia da una stima "numerica", come il calcolo *hindcast* a partire da dati di vento storico, oppure da un insieme di dati di onde attuali. I dati delle onde sono inseriti nel modello ad intervalli di tempo fissi, tipicamente con ampiezza variabile tra le 3 e le 24 ore. L'altezza d'onda ed il periodo della misurazione devono essere trasformati nei loro valori corrispettivi al frangimento in intervalli lungo costa per essere inseriti in GENESIS. I modelli di onde monocromatici mantengono il periodo costante in questo processo.

Il sistema di modellazione di GENESIS si compone di due sub – modelli. Un sub - modello calcola il tasso di trasporto *longshore* ed il cambiamento della linea di costa. L'altro è un modello di onde che calcola, con alcune condizioni semplificative, l'altezza d'onda al frangimento e l'angolo lungo costa, a partire da informazioni date ad una profondità di riferimento a largo. Questo sub – modello viene chiamato "modello interno di trasformazione delle onde", a differenza di un altro, completamente indipendente, il "modello esterno di trasformazione delle onde", che può essere utilizzato, se necessario, per fornire a GENESIS informazioni sulle onde vicine alla costa. La scelta dell'utilizzo dei due modelli deve basarsi

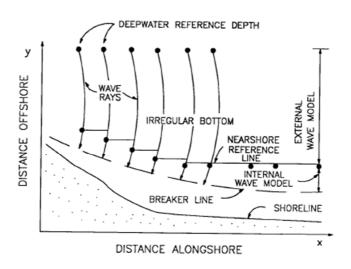
sulla disponibilità ed affidabilità dei dati, così come sulla complessità della batimetria vicina alla costa

L'uso dei modelli di trasformazione delle onde interni ed esterni è illustrato in Figura 59. Si utilizza il modello interno quando si studia un'area in cui le batimetriche risultino all'incirca parallele e rettilinee, l'angolo e l'altezza d'onda al frangimento vengono calcolate nei punti della griglia lungo costa partendo dalla profondità di riferimento dei dati offshore.

Il modello esterno prevede, invece, che la trasformazione delle onde venga calcolata in base alla batimetria presente partendo dalla profondità di riferimento *offshore*. I valori risultanti dell'altezza d'onda e della direzione per profondità lungo la costa nelle quali non è ancora avvenuto il frangimento, vengono inseriti in un file che costituirà un input per il modello interno. Queste profondità si definiscono come "linea di riferimento vicino alla costa" dalla quale il modello interno rileva cella per cella per portare le onde al frangimento. Se nel dominio del modello si trovano delle strutture che producono diffrazione, il modello interno include automaticamente gli effetti della diffrazione nel processo di determinazione delle caratteristiche delle onde al frangimento. Nel presente caso di studio, a causa della complessità dell'andamento batimetrico, si è scelto di utilizzare un modello esterno, che verrà trattato nel capitolo successivo.



a. Transformation by internal wave model only



b. Transformation by external and internal wave models

Figura 59 Modelli interni (a) ed esterni (b) di trasformazione delle onde (Hanson e Kraus 1989)

11.6 Modello interno di trasformazione delle onde

11.6.1 Onde al frangimento

La trasformazione delle onde dalla profondità o dalla linea di riferimento vicino alla costa (se viene utilizzato il modello esterno) viene inizialmente effettuata senza tenere conto della diffrazione provocata da strutture o masse di terra nel dominio. Infatti la strategia è quella di ottenere una prima approssimazione senza includere la diffrazione, ed in seguito modificare il risultato tenendo conto dei cambiamenti nel campo delle onde dovuti a ciascuna fonte di diffrazione.

Omettendo la diffrazione, ci sono tre incognite nel calcolo delle onde al frangimento: l'altezza d'onda, l'angolo dell'onda e la profondità al frangimento. Sono necessarie tre diverse

equazioni per conoscere queste tre grandezze, esse sono: l'equazione per l'altezza d'onda al frangimento basata sui dati d'onda di riferimento (Equazione 50), il criterio di frangimento depth limited (Equazione 54) e l'equazione della rifrazione dell'onda (Equazione 56).

L'Equazione 50 viene utilizzata per calcolare l'altezza delle onde al frangimento che sono state trasformate dalla rifrazione e dallo *shoaling*.

$$H_2 = K_R K_S H_{ref}$$

Equazione 50 Equazione per l'altezza d'onda al frangimento

Dove:

H_s è l'altezza d'onda al frangimento in un punto arbitrario lungo la costa;

K_R è il coefficiente di rifrazione;

K_s è il coefficiente di *shoaling;*

 H_{ref} è l'altezza d'onda nella profondità di riferimento al largo o alla linea di riferimento vicino alla costa a seconda del modello utilizzato.

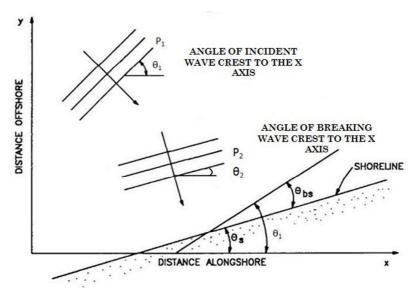


Figura 60 Angolo d'onda incidente e angolo al frangimento (modificato, originale da Hanson e Kraus 1989)

Si osservi la Figura 60, il coefficiente di rifrazione K_R è funzione dell'angolo iniziale del raggio d'onda θ_1 e dell'angolo finale in P_2 , θ_2 , la collocazione del quale è determinata dalla profondità di frangimento. K_R è dato dall'Equazione 51.

$$K_R = \left[\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2}\right]^{1/2}$$

Equazione 51 Coefficiente di rifrazione

Dove:

 θ_2 è l'angolo dell'onda al frangimento in P_2 .

Il coefficiente di *shoaling* K_S è funzione del periodo d'onda, della profondità P_1 e della profondità al frangimento ed è dato dall'Equazione 52.

$$K_S = \left[\frac{C_{g1}}{C_{g2}} \right]^{1/2}$$

Equazione 52 Coefficiente di shoaling

Dove:

 C_{g1} e C_{g2} sono le velocità di gruppo delle onde in P_1 ed in P_2 .

La lunghezza d'onda si calcola con la relazione di dispersione riportata nell'Equazione 53.

$$L = L_0 \tanh\left[\frac{2\pi D}{L}\right]$$

Equazione 53 Relazione di dispersione

Per minimizzare il tempo di elaborazione del computer viene utilizzata un'approssimazione razionale con un'accuratezza dello 0.1% per risolvere l'Equazione 53 (Hunt 1979).

L'Equazione 54 calcola l'altezza al frangimento, nel caso in cui esso sia depth limited.

$$H_b = \gamma D_b$$

Equazione 54 Criterio di frangimento depth limited

Dove:

D_b è la profondità al frangimento;

γ (Equazione 55) è l'indice di frangimento, che è funzione della ripidità delle onde in acque alte e della pendenza media della spiaggia (Smith e Kraus 1990).

$$\gamma = b - a \frac{H_0}{L_0}$$

Equazione 55 indice di frangimento

Dove:

 $a = 5.00[1 - exp(-43 \tan \beta)] e b = 1.12/[1 + exp(-60 \tan \beta)].$

L'angolo dell'onda al frangimento è calcolato attraverso la legge di Snell, riportata nell'Equazione 56.

$$\frac{\sin\theta_b}{L_b} = \frac{\sin\theta_1}{L_1}$$

Equazione 56 Legge di Snell

Dove:

 θ_b e L_b sono l'angolo e l'altezza d'onda al frangimento;

 θ_1 e L₁ sono l'angolo e l'altezza d'onda in un punto *offshore*.

Le tre quantità H_b , D_b e θ_b sono ottenute per intervalli lungo la costa attraverso la soluzione iterativa dell'Equazione 50, dell'Equazione 54 e dell'Equazione 56, come funzioni dell'altezza d'onda e dell'angolo alla profondità di riferimento e del periodo.

I modelli di rifrazione delle onde forniscono un angolo di frangimento non difratto θ_b nel sistema di coordinate fissato. Come si può osservare in Figura 61 l'angolo delle onde al

frangimento rispetto alla linea di riva richiesto per il calcolo del tasso di trasporto *longshore*, Equazione 40,si ottiene attraverso l'Equazione 57.

$$\theta_{bs} = \theta_b - \theta_s$$

Equazione 57 Angolo delle onde al frangimento rispetto alla linea di riva

Dove:

 $\theta_s = \tan^{-1}(\partial y/\partial x)$ è l'angolo che forma la linea di riva rispetto all'asse x. In GENESIS un angolo di 0 gradi significa un'incidenze delle onde parallela alla linea di riva.

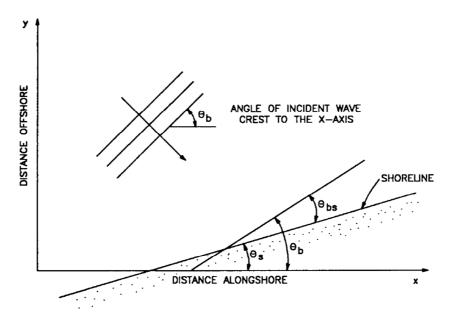


Figura 61 Definizione degli angoli al frangimento (Hanson e Kraus 1989)

Se non ci sono strutture che provocano diffrazione, le caratteristiche delle onde non difratte sono utilizzate come input per l'Equazione 40 Formula empirica del trasporto solido. Se invece sono presenti ostacoli di questo tipo l'altezza d'onda al frangimento e la direzione sono ricalcolate come descritto nei paragrafi seguenti.

11.6.2 Onde al frangimento influenzate da strutture

In Figura 62 è riportato uno schema della procedura di calcolo per l'altezza d'onda al frangimento e per l'angolo che le onde assumono a tergo della struttura (N. C. Kraus 1981, 1982, 1983).

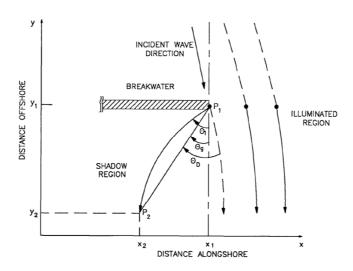


Figura 62 Schema della procedura di calcolo dell'altezza d'onda al frangimento e dell'angolo che le onde assumono a tergo delle strutture (Hanson e Kraus 1989)

Concettualmente l'area di interesse è divisa in una zona d'ombra e in una zona illuminata, tracciando un raggio d'onda diretto verso la spiaggia dalla punta della struttura con lo stesso angolo con cui l'onda incidente arriva alla struttura. Per determinare l'altezza d'onda al frangimento è necessario determinare un coefficiente di diffrazione per entrambe le regioni perché gli effetti della rifrazione possono verificarsi anche per una buona estensione anche nella regione illuminata. Per determinare l'angolo dell'onda al frangimento, all'interno della zona d'ombra, si assume che i raggi d'onda procedano radialmente dalla punta della struttura P_1 con un angolo θ_1 per arrivare ad un certo punto P_2 , dove frangono.

Non si conosce a priori l'angolo θ_1 con il quale un raggio d'onda deve partire all'interno della regione d'ombra per arrivare a P_2 . Esso è una funzione del criterio di frangimento così come della distanza lungo la costa che definisce la locazione delle celle della griglia nel calcolo numerico. Per determinare θ_1 si può utilizzare la tecnica "ray shooting" (N. C. Kraus 1982, 1984), ma questa procedura è complessa e richiede un notevole dispendio di tempo. Solitamente si utilizza come approssimazione l'angolo geometrico θ_g definito dalla linea tracciata tra P_1 e P_2 .

Nelle aree influenzate dalla diffrazione, per calcolare l'altezza d'onda al frangimento delle onde che sono state trasformate dalla diffrazione, dalla rifrazione e dallo *shoaling* si utilizza l'Equazione 58.

$$H_b = K_D(\theta_D, D_b)H_b'$$
Equazione 58

Dove:

K_D è il coefficiente di diffrazione;

 θ_D è l'angolo tra il raggio delle onde incidenti in P_1 e la linea tracciata tra P_1 e P_2 , se P_2 si trova nella regione d'ombra;

H'_b è l'altezza d'onda al frangimento nella stessa cella senza diffrazione.

I coefficienti di rifrazione, diffrazione e *shoaling* sono anch'essi funzioni della profondità in P_1 e del periodo d'onda, ma queste quantità sono conosciute e pertanto non sono incluse nell'argomento della funzione nell'Equazione 58.

Le tre incognite H_b , D_b e θ_D si ottengono negli intervalli lungo la costa dalla soluzione iterativa dell'Equazione 58, dell'Equazione 54 e dell'Equazione 56, come una funzione dell'altezza d'onda e dell'angolo al frangimento e del periodo.

Goda, Takayama e Suzuki (1978) svilupparono dei metodi per calcolare la diffrazione di onde random causata da grandi masse di terra basandosi sul concetto dello *spreading* direzionale delle onde e della penetrazione dell'energia sottoflutto rispetto alla massa di terra o alla struttura. I risultati che ottennero mostrarono che il valore del coefficiente di rifrazione lungo la linea di separazione è all'incirca 0.7.

In GENESIS la procedura di Goda, Takayama e Suzuki è stata riadattata al calcolo della simulazione delle onde e del cambiamento della linea di riva nel dominio. I dettagli riguardo ai metodi di calcolo delle onde al frangimento date dalla combinazione di diffrazione, rifrazione e *shoaling* sono forniti da N. C. Kraus (1984, 1981, 1982, 1988).

11.6.3 Modifiche del profilo

La forma piana della spiaggia cambia in conseguenza delle differenze spaziali nel trasporto solido lungo di essa. Questo cambiamento, a sua volta, altera la rifrazione delle onde. Nel modello interno di trasformazione delle onde in GENESIS, l'interazione tra la spiaggia e le onde è tenuta in conto in due modi. Il primo consiste nel fatto che con i cambiamenti della linea di riva cambia anche la distanza dalla sorgente di rifrazione, rappresentata nella Figura 63 da P_1 , e, conseguentemente, si modifica anche l'angolo del raggio di partenza θ_1 . Il secondo modo è dato dal fatto che la forma della spiaggia si distorce nella vicinanza della struttura ed i contorni offshore tendono ad allinearsi con essa. Questo effetto è tenuto in conto assumendo che l'orientamento della linea di riva in un particolare punto si estenda fino alla profondità dove si collocano la sorgente di rifrazione o la profondità di riferimento. Nonostante i contorni si assumano piani e paralleli, il loro orientamento può cambiare in funzione della posizione lungo la costa per conformarsi alla forma piana locale della spiaggia.

Il sistema di coordinate locali in Figura 63 è rappresentato da (x', y') ed è allineato con l'andamento dei contorni locali. Questo sistema di coordinate è ruotato dell'angolo di orientamento della riva locale $\theta_S = \tan^{-1}(\partial y/\partial x)$ rilevata al punto P₃. Nel sistema di

coordinate ruotato l'angolo θ' è legato all'angolo θ del sistema originale dalla relazione $\theta'=\theta+\theta_s$. Si usa l'Equazione 56 per calcolare la rifrazione delle onde nel sistema di coordinate originale, con gli angoli rimpiazzati da entrambe le parti dai corrispondenti angoli delle onde del sistema originale. Allo stesso modo anche il coefficiente di rifrazione dell'Equazione 51 può essere calcolato usando gli angoli delle onde del sistema originale. Successivamente l'angolo di incidenza dell'onda e la sua trasformazione vengono calcolati automaticamente dal modello interno di trasformazione delle onde; l'angolo dell'onda al frangimento è nuovamente convertito al sistema originale per calcolare il tasso di trasporto solido (Equazione 40). Quindi nella regione d'ombra l'altezza d'onda al frangimento è calcolato attraverso l'Equazione 59.

$$H_b = K_D(\theta_D, D_b) K_R'(\theta_1', D_b) H_b'$$
 Equazione 59

Dove:

K_R' è il coefficiente di rifrazione nel sistema di coordinate ruotato.

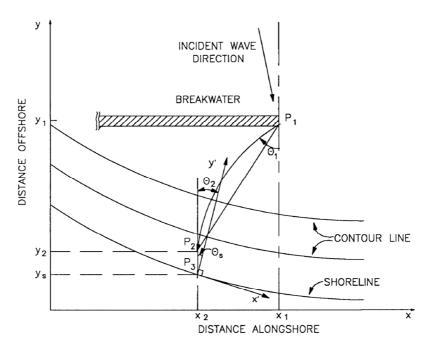


Figura 63 Angoli delle onde nelle modificazione dei contorni (Hanson e Kraus 1989)

La modificazione dei contorni viene calcolata automaticamente dal modello interno di trasformazione delle onde di GENESIS portando le onde da una profondità di riferimento sino al punto di frangimento.

11.6.4 Trasmissione delle onde nelle barriere parallele distaccate

La progettazione delle barriere parallele distaccate per la protezione delle coste richiede la considerazione di numerosi fattori che comprendono la lunghezza delle strutture, la distanza dalla costa, l'altezza della cresta, la composizione della struttura interna della barriera ed il gap tra le strutture in caso di barriere in batteria.

Il termine trasmissione delle onde si riferisce al movimento delle onde aldilà ed attraverso una struttura, è presente nella maggior parte delle applicazioni pratiche. Talvolta, per avere un maggiore controllo del cambiamento della spiaggia, si costruiscono strutture porose o basse per permettere la penetrazione dell'energia. Uno dei miglioramenti più significativi della Versione 2 di GENESIS è rappresentato proprio dalla capacità di simulazione della trasmissione delle onde nelle barriere distaccate e del suo effetto sul cambiamento della linea di riva.

Per descrivere la trasmissione nel sistema del modello è necessario fornire un coefficiente di trasmissione K_T per ogni barriera. Il coefficiente di trasmissione è definito come il rapporto tra l'altezza dell'onda trasmessa a tergo della barriera e l'altezza d'onda incidente subito prima della barriera. Quindi esso varia tra 0 e 1, dove il valore 0 corrisponde all'assenza di trasmissione e 1 implica una trasmissione completa.

La derivazione dell'algoritmo della trasmissione in GENESIS è stato sviluppato seguendo tre criteri:

- per K_T che tende a 0, la diffrazione dell'onda che viene calcolata è uguale a quella che viene data dalla teoria della diffrazione standard per una barriera impermeabile ed infinitamente alta;
- se due finestre di energia adiacenti hanno il medesimo K_T non deve avvenire diffrazione, quindi l'altezza d'onda risulta uniforme presso il confine;
- nel confine tra due finestre di energia con differente KT, l'energia dell'onda deve essere convogliata dalla finestra con le onde più alte alla finestra con le onde più piccole. L'energia d'onda trasferita deve essere proporzionale al rapporto tra i due coefficienti di trasmissione.

I criteri conducono all'Equazione 60:

$$f(x) = \begin{bmatrix} K_D + R_{KT}(1 - K_D) & \theta_D > 0 \\ K_D - R_{KT}(K_D - 0.5) & \theta_D = 0 \\ K_D(1 - R_{KT}) & \theta_D < 0 \end{bmatrix}$$

Dove:

 R_{KT} è il rapporto tra il valore più piccolo del coefficiente di trasmissione ed il valore più grande per due barriere adiacenti.

La Figura 64 mostra un ipotetico esempio di cambiamento della linea di costa a tergo di una barriera distaccata. Come si attendeva, l'estensione verso il mare del saliente decresce al crescere della trasmissione delle onde. Inoltre il saliente si allarga leggermente al crescere della trasmissione e le aree erose ai lati di esso si riempiono.

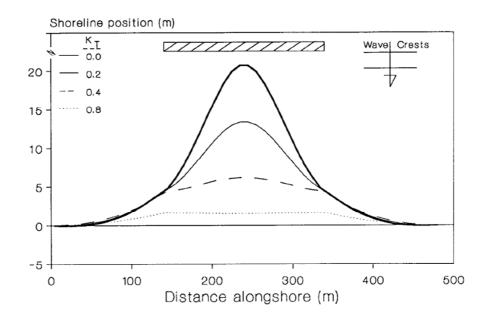


Figura 64 Cambiamento della linea di costa come funzione della trasmissione (Hanson e Kraus 1989)

11.6.5 Contorni *offshore* rappresentativi

Una delle assunzioni di base del modello prevede che la linea di riva si muova parallelamente a se stessa. Conseguentemente, i contorni *offshore* si muovono parallelamente alla linea di riva. Se questa assunzione venisse applicata direttamente nel modello interno ci sarebbe una trasformazione delle onde poco realistica nelle zone dove vi sono rapidi cambiamenti della linea di costa. Per ovviare a questo problema, GENESIS offre l'opzione di utilizzare dei contorni smussati per i calcoli del modello interno di trasformazione delle onde. Con questa opzione il contorno smussato viene assunto come rappresentativo per tutti i contorni tra la profondità di input delle onde e la profondità di frangimento delle onde non difratte. L'orientamento del contorno *offshore* rappresentativo è ricalcolato mensilmente utilizzando la posizione della linea di costa in quel momento.

11.7 Ripidità limitante dell'onda in acque alte

I dati di input delle onde *offshore* talvolta vengono manipolati per diverse ragioni, ad esempio per simulare casi estremi o per testare la sensitività del modello. In questi casi incrementando l'altezza d'onda si arriva ad onde con ripidità impossibili fisicamente. GENESIS controlla che le onde che vengono fornite in input rispettino il criterio di ripidità limitante di Mitchell (1893) riportato nell'Equazione 61

$$\frac{H_0}{L_0} = 0.142$$

Equazione 61 Criterio di ripidità limitante delle onde di Mitchell (1893)

Se la ripidità dell'onda calcolata eccede il valore 0.142, l'altezza d'onda in acque alte viene ridotta fino a soddisfare il criterio dell'Equazione 61, mantenendo il medesimo valore di periodo. Viene inoltre immesso un messaggio di errore.

11.8 Finestre di energia d'onda

Il concetto della finestra di energia d'onda è centrale in GENESIS e determina la sua struttura algoritmica. Le finestre di energia costituiscono un potente mezzo per descrivere il frangimento delle onde lungo la costa ed il trasporto solido ad esse associato per una grande varietà di configurazioni.

Una finestra di energia è un area aperta alle onde incidenti vista da un particolare tratto di costa. Dal punto di vista operativo, una finestra di energia è definita da due margini che sono considerati come i limiti della penetrazione delle onde alla spiaggia. Le finestre possono essere separate da pennelli o moli che provocano diffrazione, da barriere che non provocano trasmissione e dalle estremità delle barriere che provocano trasmissione. L'energia delle onde incidenti per raggiungere la riva deve entrare attraverso una di queste finestre. Una stessa area può essere aperta a più di una finestra di energia.

Nello stadio iniziale di calcolo del modello, le strutture vengono supposte come non trasmissive e quindi l'energia che le colpisce non viene propagata aldilà di esse. In base al concetto delle finestre di energia ed a quello della non trasmissione da parte delle strutture, la linea di costa è suddivisa in quelli che vengono definiti come "domini di calcolo del trasporto solido". Questi domini sono costituiti da segmenti di costa limitati ad ogni lato da strutture connesse alla costa che provocano diffrazione o da limiti del modello. GENESIS risolve l'equazione del cambiamento della linea di costa in modo indipendente per ogni dominio, salvo per quelle situazioni in cui si ha passaggio di sedimento attraverso o aldilà delle strutture, che implica il passaggio di sedimento tra i due domini.

Si possono avere delle finestre di energia limitate da due strutture che costituiscono due diverse fonti di diffrazione, una sulla destra (R) ed una sulla sinistra (L), ciascuna delle quali ha un coefficiente di diffrazione diverso, rispettivamente K_{DR} e K_{DL} . Il modello interno in questi casi calcola un coefficiente di diffrazione combinato K_{D} per la finestra secondo l'Equazione 62.

$$K_D = K_{DL}K_{DR}$$

Equazione 62 Coefficiente di diffrazione combinato

Se una finestra di energia è aperta da una parte sola, il coefficiente di diffrazione per quel lato viene considerato pari a 1.0.

11.9 Schema di soluzione numerica

Se sono disponibili tutte le informazioni necessarie per risolvere l'Equazione 39 Equazione generale che governa il cambiamento della posizione della linea di riva, l'Equazione 40 Formula empirica del trasporto solido e l'Equazione 54 Criterio di frangimento depth limited, allora è possibile calcolare la risposta della linea di costa all'azione del moto ondoso. In certe condizioni semplificate è possibile trovare la forma matematica chiusa dell'Equazione 39, ma per descrivere le caratteristiche e la configurazione delle strutture e della costa, includendo le onde che variano lungo la costa e nel tempo, l'Equazione 39 deve essere risolta numericamente. Nella procedura di soluzione numerica, la distanza lungo la costa viene suddivisa in celle di una determinata ampiezza e la durata della simulazione similmente viene suddivisa in piccoli elementi definiti time step. Se le celle ed i time step sono piccoli si possono calcolare accuratamente le soluzioni delle equazioni differenziali parziali risolvendo numericamente le equazioni differenziali con soluzione limitata.

11.9.1 Accuratezza fisica e numerica

Riferendosi alla Figura 57 ed all'Equazione 39 il cambiamento della linea di costa si può matematicamente scrivere come riportato nell'Equazione 63:

$$\Delta y = -\frac{\Delta t}{(D_B + D_C)} \frac{\Delta Q}{\Delta x}$$

Equazione 63 Cambiamento della linea di riva

Dove:

ΔQ è la differenza del tasso di trasporto solido lungo la costa ai wall delle celle.

Il contributo a Δy dato dai *source* o dai *sink* lineari di sedimento viene trascurato per semplicità.

Il cambiamento di posizione della linea di costa Δy è direttamente proporzionale a Δt ed inversamente proporzionale a Δx .

L'accuratezza numerica si riferisce al grado in cui lo schema numerico fornisce una soluzione accurata alle equazioni differenziali parziali.

L'accuratezza fisica si riferisce al grado in cui l'Equazione 39 ed i relativi input associati rappresentano i processi che si verificano in realtà. Essa dipende dalla qualità dei dati forniti in input ed al grado con cui le assunzione di base del modello di cambiamento della linea di costa approssimano le condizioni del sito.

Una buona accuratezza numerica non necessariamente implica una buona accuratezza fisica. Per una rapida soluzione numerica è necessario un *time step* e delle celle il più grandi possibile. Tuttavia l'accuratezza fisica e numerica diminuiscono al crescere del *time step* e dell'ampiezza

delle celle, perché con intervalli più ampi diminuisce la qualità della rappresentazione delle condizioni di moto ondoso e del cambiamento della linea di riva.

11.10 Sistema della griglia e schema di risoluzione delle equazioni differenziali con soluzioni finite

11.10.1 Griglia sfalsata

In GENESIS le quantità calcolate lungo la linea di riva sono discretizzate lungo una griglia sfalsata, in cui la posizione sulla riva y_i è definita al centro delle celle della griglia ed il tasso di trasporto solido è invece definito al i *wall* delle celle come mostrato in Figura 65. Il margine sinistro è collocato alla cella 1 ed il margine destro è collocato alla cella N. In totale quindi vi sono N valori della posizione della linea di costa e quindi i valori della posizione iniziale della linea di costa sono dati a N punti. Ci sono N+1 valori del trasporto solido lungo costa poiché vi sono N+1 *wall* che racchiudono N celle.

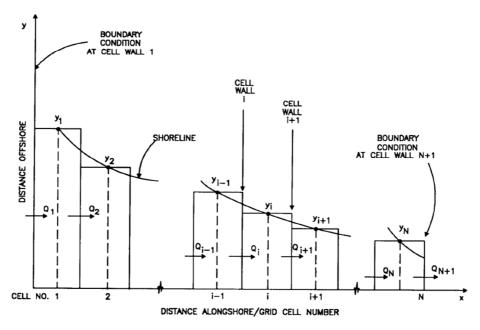


Figura 65 Schema della griglia sfalsata (Hanson e Kraus 1989)

I valori del trasporto solido ai margini Q_1 e Q_{N+1} devono essere forniti al software, che invece calcolerà i rimanenti valori Q_i e y_i . Poiché le quantità Q_i sono funzioni delle condizioni del moto ondoso, tutte le quantità del moto ondoso sono calcolate ai *wall*. Le estremità delle strutture sono anche asse collocate ai *wall*. I ripascimenti, gli sbocchi fluviali e altri *sources* o *sinks* di sedimento sono collocati al centro delle celle.

11.10.2 Schema di risoluzione delle equazioni differenziali implicite con soluzione limitata

Nella testo seguente "i" in posizione di pedice indica una quantità riferita ad un'arbitraria cella i - esima lungo la spiaggia. L'apice "i" invece indica una quantità riferita al successivo step temporale, mentre le quantità prive di apice si riferiscono al presente $time\ step$. Si noti che le quantità Q' e y' non sono note e saranno calcolate, mentre quantità come q' e D_B' sono dati che vengono immessi nel software prima della simulazione e quindi noti.

Viene utilizzato lo schema implicito di Crank – Nicholson nel quale le derivate $\partial Q \partial x$ ad ogni punto della griglia sono espresse come medie equamente pesate tra il presente *time step* e quello successivo, come mostrato nell'Equazione 64 (Crank 1975).

$$\frac{\partial Q_i}{\partial x} = \frac{1}{2} \left[\frac{Q'_{i+1} - Q'_i}{\Delta x} + \frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta x} \right]$$

Equazione 64 Schema implicito di Crank – Nicholson

Sostituendo l'Equazione 64 nell'Equazione 39 ed effettuando la linearizzazione degli angoli delle onde nell'Equazione 40 in termini di $\partial y \setminus \partial x$ si ottengono due sistemi di coppie di equazioni in due incognite, y'_1 e Q'_1 , mostrate nell'Equazione 65 e nell'Equazione 66.

$$y_i' = B'(Q_i' - Q_{i+1}') + yc_i$$

Equazione 65

$$Q_i' = E_i(y_{i+1}' - y_i') + F_i$$
Equazione 66

Dove:

B' è rappresentato dall'Equazione 67:

$$B' = \frac{\Delta t}{[2(D_B + D_C')\Delta x]}$$

Yc_i è una funzione di quantità note, tra le quali q'_i e q_i;

E_i è una funzione dell'altezza d'onda, angolo d'onda e altre quantità note;

F_i è una funzione similare a E_i.

Per risolvere l'Equazione 65 e l'Equazione 66 si utilizza il così detto algoritmo a doppia scansione.

11.11 Condizioni dei limiti laterali e vincoli

GENESIS richiede di specificare i valori di Q per entrambi i limiti laterali, ovvero per i *wall* 1 e N+1, per ogni *time step*. La determinazione di questi valori è estremamente importante ai fini della bontà dei risultati della simulazione.

I limiti ideali sono i punti terminali delle celle litorali, per esempio lunghi promontori e lunghi moli o pennelli. D'altro canto anche le strutture ingegneristiche, come pennelli, barriere o muri radenti possono essere presenti anche all'intero del dominio di interesse. Questi elementi interrompono il movimento del sedimento lungo la linea di costa e così costituiscono dei vincoli per il trasporto solido che devono essere incorporati nella simulazione.

11.11.1 Limite laterale pinned beach

Si utilizza quando è possibile trovare una porzione di costa in prossimità del dominio che non subisce dei movimenti apprezzabili nel tempo. Il concetto di *pinned beach*, espresso in termini di trasporto solido, è formulabile come $Q_1=Q_2$, considerando il limite sinistro, e come $Q_{N+1}=Q_N$, considerando il limite destro. Facendo riferimento all'Equazione 63, se $\Delta Q=0$ anche $\Delta y=0$ e quindi la linea di riva non si muove. Questo tipo di limite dovrebbe essere collocato lontano dal progetto per assicurare il fatto che le condizioni in prossimità del limite non siano influenzate dai cambiamenti che hanno luogo nel progetto stesso.

11.11.2 Limite laterale *gated*

Elementi come pennelli, moli, frangiflutti connessi alla riva e promontori che bloccano completamente o parzialmente il movimento del sedimento lungo la costa, se sono collocati ad uno degli estremi della griglia di calcolo possono rappresentarne i limiti. Se essi invece sono collocati all'interno del dominio di calcolo si comporteranno come dei vincoli per il trasporto solido e per il cambiamento della linea di costa. La rappresentazione è la stessa in entrambi i casi, ma si trova in punti diversi dello schema di risoluzione.

L'effetto di queste strutture quando sono collocate sui limiti del dominio si determina in base a quanto sedimento può passare aldilà della struttura. Bisogna considerare sia il sedimento che entra che quello che esce; infatti vi sono dei casi in cui le strutture sono tali da costituire dei limiti selettivi, dove ad esempio il sedimento esce, ma non può entrare. Questa condizione di limite laterale *gated* viene definita come condizione di limite a pennello. La rappresentazione matematica di questa condizione è piuttosto complessa, ma in ogni caso l'azione di regolazione presso il limite è controllata dall'azione combinata del passaggio e della trasmissione di sedimento, di cui si parlerà nel prossimo paragrafo.

11.11.3 Movimento del sedimento

In GENESIS possono essere simulati due tipi di movimento di sedimento aldilà delle strutture. Un tipo di movimento si svolge attorno all'estremità finale della struttura e viene definito passaggio (bypassing); l'altro avviene attraverso e aldilà della struttura e viene detto trasmissione (transmission). Il passaggio avviene solo quando la profondità all'estremità della struttura D_G è minore della profondità attiva di trasporto D_{LT} . D_G si ricava dalla forma del profilo del fondale conoscendo la lunghezza della struttura ed il punto in cui è collocata. Tuttavia poiché le strutture sono collocate nei wall delle celle tra due posizioni della linea di riva che sono state calcolate, questa profondità non è univoca. In GENESIS viene considerata la profondità sopraflutto.

Per rappresentare il passaggio del sedimento viene introdotto un fattore di passaggio detto BYP, definito dall'Equazione 68:

$$BYP = 1 - \frac{D_G}{D_{TL}}$$

Equazione 68 Fattore di passaggio (bypassing)

Dove:

 $D_G \leq D_{LT}$

Esso implica una distribuzione uniforme in direzione *cross – shore* del tasso di trasporto *longshore*.

Se $D_G > D_{LT}$ BYP=0. Quindi i valori di BYP variano tra 0 e 1. Se BYP=0 significa che non si ha passaggio di sedimento e se BYP=1 significa che tutto il sedimento può potenzialmente oltrepassare la posizione della struttura. Il valore di BYP dipende dalle condizioni del moto ondoso ad ogni *time step*, poiché D_{LT} è funzione dell'altezza d'onda e del periodo.

La trasmissione avviene verso terra, aldilà ed attraverso una struttura connessa a terra, come ad esempio un pennello. Per descrivere la trasmissione viene introdotto un analogo fattore di permeabilità PERM. Un valore di PERM nullo viene assegnato a quelle strutture che sono molto alte rispetto al valore medio del livello dell'acqua e si estendono molto verso terra. Una struttura completamente "trasparente" ha invece un valore di PERM pari a 1. Quindi PERM assume valori nell'intervallo da 0 a 1 e deve essere specificato dal modellatore stesso che si deve basare sulle caratteristiche strutturali dell'opera, la sua elevazione ed il range di marea del sito. Il valore ottimale di PERM deve essere determinato nel processo di calibrazione del modello.

Una volta che vengono determinati i valori di PERM e BYP, GENESIS calcola la frazione totale F di sedimento che passa aldilà, attraverso ed oltre la struttura connessa alla riva, secondo l'Equazione 69

$$F = PERM(1 - BYP) + BYP$$

Equazione 69 (Hanson 1987)

Questa frazione viene calcolata per ogni struttura connessa alla riva.

11.11.4 Muri radenti

Un muro radente, o più in generale, qualsiasi struttura parallela e radente alla costa non erodibile, impone un vincolo alla posizione della linea di riva che non può spostarsi verso terra aldilà della struttura stessa. Sono state sviluppate delle procedure per calcolare la posizione della linea di costa in cui è presente un muro radente (Hanson e Kraus 1985, 1986b). la procedura è consistente con la teoria della modellizzazione della risposta della linea di riva e ha le seguenti tre proprietà:

- 1. la linea di riva di fronte al muro radente non può retrocedere aldilà della struttura;
- 2. il volume del sedimento si conserva;
- 3. la direzione del trasporto solido *longshore* presso il *wall* è la stessa di quella del trasporto locale potenziale.

GENESIS inizialmente calcola il trasporto *longshore* come se tutto il sedimento presente fosse disponibile per il trasporto (tasso di trasporto potenziale). Nelle celle della griglia dove viene violato il vincolo del muro radente, il trasporto solido e la posizione della linea di riva vengono corretti. Queste quantità vengono corrette anche nelle celle confinanti per preservare il volume di sedimento e la direzione del trasporto solido. Non è ovviamente possibile collocare due muri radenti nella medesima cella perché significherebbe avere due posizioni di linea di riva nello stesso punto.

11.12 Ripascimenti

I ripascimenti costituiscono un metodo molto utilizzato, sia nel passato che attualmente, per proteggere la costa e per controllare le inondazioni, oltre che per motivi ricreativi, commerciali ed ambientali. Solitamente il ripascimento viene accompagnato dalla costruzione di opere rigide come pennelli o barriere che possano prolungarne la vita.

GENESIS può rappresentare il comportamento di spiagge che hanno subito dei ripascimenti considerando le seguenti assunzioni:

- il materiale con cui viene effettuato il ripascimento ha la stessa granulometria media del sedimento originariamente presente;
- il profilo del ripascimento rappresentato nel modello ha la forma all'equilibrio corrispondente alla sua granulometria;

 l'altezza della berma della spiaggia dopo il ripascimento è la stessa della spiaggia naturale.

Queste assunzioni sono necessarie poiché i parametri di trasporto, la forma del profilo all'equilibrio e l'altezza della berma vengono considerate costanti per l'intera spiaggia oggetto di simulazione.

Dopo che il materiale del ripascimento viene posto nel sito d'interesse esso viene ridistribuito dal moto ondoso in modo da raggiungere la forma di equilibrio della spiaggia. GENESIS interpreta il volume aggiunto come già conformato al profilo di equilibrio. Pertanto per introdurre un ripascimento in GENESIS, il modellatore deve calcolare l'entità Y_{add} dell'avanzamento della spiaggia. Questa distanza può essere calcolata considerando il volume totale del ripascimento come il prodotto della profondità di chiusura più l'altezza della berma, la lunghezza lungo la costa del ripascimento e Y_{add} . Il modellatore deve considerare se ritenere appropriato o meno rimuovere una percentuale del volume totale del ripascimento che può essere perso, perché portato a largo dal moto ondoso, fuori dal sistema litorale. GENESIS inserisce il totale di Y_{add} sulla spiaggia in uguali incrementi Δy di avanzamento della linea di costa, lungo la lunghezza specificata del progetto, per *time step*, lungo il periodo di costruzione del ripascimento specificato dall'utente.

L'input di cambiamento può anche essere negativo, per rappresentare un arretramento della spiaggia, ad esempio nel caso di prelievo di sedimento.

11.13 Tasso di trasporto solido *longshore*: considerazioni pratiche

Osservando l'Equazione 40 Formula empirica del trasporto solido, si evince che il tasso di trasporto solido è funzione delle onde e dell'orientamento della linea di costa per ogni *time step* e per ogni cella della griglia, eccetto che per i limiti *pinned beach*. È necessario fare delle considerazioni sulle applicazioni pratiche che riguardano le quantità citate:

- trasporti solidi multipli prodotti da multiple sorgenti di onde;
- tassi di trasporto derivati (tasso di trasporto netto e lordo);
- soglia effettiva per il trasporto solido.

I tassi di trasporto multiplo sono prodotti da diverse sorgenti indipendenti. Questi casi si ritrovano soprattutto in contesti oceanici, dove non di rado si trovano onde di *swell*, che si generano anche in siti molto lontani da quello di studio, contestualmente a onde da vento locali. GENESIS in questi casi effettua le operazioni di calcolo basandosi sull'assunzione che ogni sorgente di onde porti ad un tasso di trasporto di sedimento indipendente. Il tasso di

trasporto risultante per ogni *wall* della griglia è dato dalla sommatoria dei tassi dati da tutte le sorgenti di onde presenti per quel *wall*. L'interfaccia di GENESIS richiede all'utente di specificare quante sono le sorgenti di onde totali presenti. Il file in input contente i dati da onde deve rispecchiare questo dato.

È possibile calcolare dei tassi trasporto netto e lordo considerando le due direzioni, destra (rt) e sinistra (lt), che il trasporto solido *longshore* può avere rispetto ad un osservatore che guarda il mare con la spiaggia alle spalle.

Il tasso di trasporto solido lordo Q_g (Equazione 70) è definito come la somma dei tassi di trasporto verso destra e verso sinistra attraverso un punto, come ad esempio attraverso l'i esima cella, lungo la costa in un determinato periodo di tempo.

$$Q_g = Q_{rt} + Q_{lt}$$

Equazione 70 Tasso di trasporto solido lordo

Si può utilizzare ad esempio per calcolare quanto sedimento entra in un determinato periodo di tempo all'interno di un'insenatura.

Il tasso di trasporto solido netto Q_n (Equazione 71) è la differenza tra il movimento verso destra e quello verso sinistra che passa da un determinato punto sulla linea di riva in un determinato periodo di tempo.

$$Q_n = Q_{rt} - Q_{lt}$$

Equazione 71 Tasso di trasporto solido netto

Esso è una somma vettoriale dei tassi di trasporto verso destra e verso sinistra ed è la quantità necessaria per determinare se una spiaggia erode o si accresce. GENESIS simula l'evoluzione della linea di costa considerando le differenze nel tasso di trasporto solido netto lungo la costa. Osservando l'Equazione 40 Formula empirica del trasporto solido si nota che il termine dominante per il calcolo del trasporto solido dipende strettamente dall'altezza d'onda e dalla direzione. Si consideri inoltre che a parità di periodo e di direzione a largo, un'onda con altezza d'onda maggiore frangerà con un angolo maggiore. Solitamente una costa esposta al mare aperto subisce eventi ondosi che vanno dalla calma completa alla tempesta. Poiché il tasso di trasporto si amplifica notevolmente con l'aumentare dell'altezza d'onda e meno anche con l'aumentare dell'angolo di incidenza, è ragionevole applicare una soglia per eliminare gli eventi ondosi che determinano un tasso di trasporto solido trascurabile e non sono fattori significativi per il cambiamento della linea di costa. Gli eventi ondosi che vengono individuati come inferiori a tale soglia vengono flaggati attraverso uno specifico software, WWL Data, con un periodo pari a -99. GENESIS leggendo questo valore si muove direttamente all'evento ondoso successivo, senza eseguire i calcoli per il trasporto solido e per il cambiamento della linea di costa, allegerendo notevolmente il lavoro computazionale della macchina.

Kraus, Hanson e Larson nel 1988 hanno sviluppato un metodo per applicare questa soglia in un modo obiettivo. Tale soglia è calcolata attraverso l'Equazione 72.

$$H_b X_b V = 3.9$$

Equazione 72 Soglia di calcolo del trasporto solido (Kraus, Hanson e Larson 1988)

Dove:

H_b è l'altezza d'onda al frangimento;

X_b è la larghezza della surf zone;

V è la velocità media della corrente di trasporto solido. Essa è stata empiricamente stimata dall'Equazione 73

$$V = 1.35(H_h/2)(\gamma g/H_h)^{1/2} \sin 2\theta_{hs}$$

Equazione 73 Formula empirica per calcolare la velocità della corrente di trasporto solido (Komar e Inman 1970)

Se il valore a sinistra dell'Equazione 72 è minore o uguale del valore soglia a destra, allora le condizioni di quel moto ondoso in acque profonde sono da considerarsi calme ed il trasporto solido ad esse associate è trascurabile.

11.14 Descrizione dei file di input e di output di GENESIS

I file in input per GENESIS sono:

- Andamento batimetrico. L'andamento batimetrico che caratterizza il dominio spaziale, le coordinate dell'origine, l'azimuth e le dimensioni delle celle sono fornite attraverso un file creato attraverso Grid Generator. È fondamentale in quanto le irregolarità batimetriche causano gradienti di trasporto locale e cambiamenti della linea di costa.
- Moto ondoso. Il moto ondoso è la causa primaria della creazione del trasporto di sedimento lungo la costa e quindi del cambiamento della linea di riva. Il file che viene fornito in input è ricavato partendo dai dati di moto ondoso attraverso l'utilizzo del software WWL DATA.
- Posizione della spiaggia e caratteristiche. Vengono forniti diversi parametri e caratteristiche della spiaggia che influenzano il trasporto solido ed il cambiamento della linea di costa. Innanzitutto è necessario fornire in input il file delle stazioni che contiene i parametri e gli spettri delle onde presso dei punti stabiliti del dominio spaziale. Inoltre vengono inseriti i dati riguardo alla granulometria del sedimento, l'altezza media della berma e la profondità di chiusura. Vi sono poi i valori dei parametri di calibrazione K₁ e K₂. Altri input sono i tipi di limiti del domino, le posizioni

e le caratteristiche delle strutture ingegneristiche presenti e le linee di riva storiche e di partenza per la simulazione.

I file che GENESIS restituisce in output sono le linee di riva simulate ed i tassi di trasporto che si sono verificati lungo la linea di costa. Viene fornito il visualization file che contiene i maggiori risultati della simulazione su tutto il dominio spaziale. Inoltre vengono fornite i parametri delle onde al frangimento calcolate dal modello interno.

12Teoria della modellazione di STWAVE

La propagazione delle onde da largo a costa è influenzata da molteplici fattori quali la batimetria, le correnti generate dal vento, dalle onde e dalla marea, le variazioni del livello del mare generate dalla marea e le strutture costiere. Tuttavia la conoscenza di questo fenomeno complesso è fondamentale per simulare il cambiamento della linea di costa ed è quindi molto comune l'utilizzo di modelli numerici. Essi infatti sono molto più sofisticati, ma anche molto più economici, rispetto alle misurazioni in campo ed ai modelli fisici.

STWAVE (STeady – state spectral WAVE) è un modello spettrale a fase media (D. Resio 1987, 1988a, 1988b, J. E. Davis 1992, Smith, Resio e Zundel 1999). STWAVE è un modello di equazioni differenziali con soluzioni limitate allo stato stazionario basato sulle equazioni all'equilibrio del moto ondoso.

L'applicazione di questo modello è finalizzata alla conoscenza del cambiamento dei parametri del moto ondoso nella propagazione da largo a costa dal punto di vista quantitativo.

In acque profonde il campo delle onde è relativamente omogeneo su una scala spaziale delle decine di kilometri, ma vicino alla costa, dove le onde sono fortemente influenzate dalla batimetria, dal livello dell'acqua e dalla corrente, i parametri possono variare anche sotto la scala delle decine di metri. Le informazioni riguardanti le onde a largo possono derivare da un misuratore in campo, come nel caso oggetto di studio la boa ondametrica di La Spezia, oppure da onde *hindcast* o *forecast*. Le informazioni riguardanti i parametri delle onde vicine alla costa sono fondamentali per progettare qualsiasi opera di protezione costiera.

STWAVE simula la rifrazione e lo *shoaling* indotti dalla profondità e dalle correnti, il frangimento indotto dalla profondità e dalla ripidità dell'onda, la diffrazione, la crescita delle onde da vento, l'interazione tra onde ed il *whitecapping*, che ridistribuisce e dissipa l'energia in un campo d'onde crescente.

STWAVE è un modello che utilizza lo spettro come rappresentazione statistica del campo delle onde.

12.1 Assunzioni di base del modello

Le assunzioni di base di STWAVE Versione 3.0 sono:

• Pendenza lieve e riflessione delle onde trascurabile. STWAVE è un modello mezzo piano, ovvero in cui l'energia delle onde può essere propagata solo dal largo verso costa (±87.5 deg dall'asse x della griglia, che è tipicamente la direzione normale

- approssimata). Le onde che vengono riflesse dalla riva vengono propagate in una direzione fuori da questo mezzo piano e così vengono trascurate.
- Condizioni di onde offshore omogenee dal punto di vista spaziale. La variazione dello spettro delle onde lungo il limite offshore del dominio del modello solitamente è molto piccola, almeno per modelli con scale spaziali delle decine di kilometri, e solitamente è sconosciuta. Pertanto in STWAVE lo spettro in input è costante per tutto il limite offshore.
- Onde, correnti e venti in stato stazionario. STWAVE è stato formulato come un modello a stato stazionario, in modo da ridurre il tempo di lavoro della macchina. Esso è appropriato per condizioni di moto ondoso che variano più lentamente rispetto al tempo che impiegano le onde ad attraversare la griglia computazionale. Per quanto riguarda la generazione delle onde, le condizioni di stato stazionario implicano che il vento ha soffiato abbastanza a lungo da ottenere un mare fetch limited o fully developed.
- Rifrazione lineare e shoaling. STWAVE comprende solo la rifrazione lineare e lo shoaling e quindi non rappresenta l'asimmetria delle onde. L'accuratezza del modello è ulteriormente ridotta, in particolare vi è una sottostima delle altezze d'onda, per numeri di Ursell³ troppo alti.
- Corrente uniforme rispetto alla profondità. L'interazione onde corrente nel modello
 è basata su una corrente che è costante nella colonna d'acqua. Se nella forza della
 corrente vi sono forti gradienti verticali, si deve tenere conto che la loro influenza sulla
 rifrazione e lo shoaling non è rappresentata nel modello.
- Attrito col fondo trascurabile. In molti modelli l'attrito con il fondo è utilizzato come coefficiente di calibrazione per portare il modello in linea con i risultati ottenuti con le misurazioni. Benché l'attrito sia facile da includere in un modello, determinare il valore corretto di tale coefficiente è difficoltoso. Inoltre la distanza di propagazione nei modelli vicini alla costa è dell'ordine delle decine di kilometri e quindi la dissipazione cumulativa dell'attrito con il fondo è piccola. Per queste ragioni nel modello STWAVE l'attrito con il fondo è trascurato.
- Radiation stress lineare. Il radiation stress nel modello STWAVE è calcolato basandosi sulla teoria lineare delle onde (Smith, Sherlock e Resio 2001).

135

³ Il numero di Ursell è un parametro adimensionale che indica la non linearità di onde lunghe da gravità di superficie su uno strato di un fluido. Esso è definito come $U=\frac{H\lambda^2}{h^3}$ dove H è l'altezza d'onda, h è la profondità media e λ è l'altezza d'onda. Per onde lunghe (λ >>h) e valori di U<10 è applicabile la teoria lineare di Stokes, altrimenti è necessario applicare teorie non lineari (teoria delle onde cnoidali e teoria dell'onda lunga non lineare) (Ursell, Dean e Yu 1960)

12.2 Equazioni che disciplinano il modello

L'interazione delle onde con la corrente è considerato in un sistema di riferimento solidale con il movimento della corrente. I parametri delle onde in questo sistema sono segnati da "r" in pedice, che si riferisce al termine "relativo" alla corrente ed i parametri nel sistema di riferimento fisso hanno in pedice "a" che indica "assoluto". In Figura 66 sono riportati i diversi vettori coinvolti nelle onde e nelle correnti. La relazione di dispersione delle onde nel sistema di riferimento in movimento è dato dall'Equazione 74.

$$\omega_r^2 = gk \tanh kd$$

Equazione 74 Relazione di dispersione delle onde nel sistema di riferimento in movimento, relativo alla corrente (Jonsson 1990)

Dove:

ω è la frequenza angolare;

g è l'accelerazione gravitazionale;

k è il numero di onde;

d è la profondità dell'acqua.

Nel sistema di riferimento assoluto la relazione di dispersione è data dall'Equazione 75.

$$\omega_a = \omega_r + KU \cos(\delta + \alpha)$$

Equazione 75 Relazione di dispersione delle onde nel sistema di riferimento fisso

Dove:

U è la velocità della corrente;

 δ è la direzione della corrente relativa all'asse x del sistema di riferimento;

 α è la direzione normale alla cresta delle onde.

Il numero di onde si ottiene sostituendo l'Equazione 74 nell'Equazione 75 e risolvendola iterativamente per k. Il numero di onde e la lunghezza d'onda ($L=2\pi/k$) sono gli stessi per entrambi i sistemi di riferimento.

Le soluzioni per la rifrazione e lo *shoaling* richiedono anche la celerità delle onde, C, e la celerità di gruppo, C_g, in entrambi i sistemi di riferimento. Nel sistema di riferimento relativo alla corrente si hanno l'Equazione 76 e l'Equazione 77.

$$C_r = \frac{\omega_r}{k}$$

Equazione 76 Celerità d'onda nel sistema di riferimento relativo alla corrente

$$C_{gr} = 0.5C_r \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

Equazione 77 Celerità di gruppo nel sistema di riferimento relativo alla corrente

La direzione della celerità e della celerità di gruppo relative è α , la direzione ortogonale all'onda.

Nel sistema di riferimento assoluto si ha l'Equazione 78 e l'Equazione 79.

$$C_a = C_r + U\cos(\delta - \alpha)$$

Equazione 78 Celerità d'onda nel sistema di riferimento assoluto

$$\left(C_{ga}\right)_{i} = \left(C_{gr}\right)_{i} + (U)_{i}$$

Equazione 79 Celerità di gruppo nel sistema di riferimento assoluto

Dove:

"i" in pedice indica la notazione tensore per la componente x e y.

Anche la direzione della celerità nel sistema assoluto è perpendicolare alla cresta dell'onda. La direzione della celerità di gruppo assoluta definisce la direzione del raggio d'onda, ed infatti il raggio d'onda è definito dall'Equazione 80.

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \cos \alpha + U \cos \delta} \right)$$

Equazione 80 Direzione del raggio d'onda

La distinzione tra l'ortogonale all'onda, ovvero la direzione ortogonale alla cresta dell'onda, ed il raggio d'onda, ovvero la direzione di propagazione dell'energia, è importante per descrivere l'interazione onda – corrente. Se non si considera la corrente, i raggi d'onda e l'ortogonale all'onda sono la medesima cosa, ma con le correnti l'energia dell'onda si muove lungo il raggio, mentre la direzione di propagazione dell'onda è definita dall'ortogonale.

La direzione ortogonale all'onda per condizioni di stato stazionario è data dall'Equazione 81.

$$C_{ga}\frac{D\alpha}{DR} = -\frac{C_r k}{\sinh 2kd}\frac{Dd}{Dn} - -\frac{k_i}{k}\frac{DU_i}{Dn}$$

Equazione 81 Direzione ortogonale dell'onda allo stato stazionario (Jonsson 1990, Mei 1989)

Dove:

R sono le coordinate in direzione del raggio d'onda;

n sono le coordinate normali all'ortogonale all'onda.

L'equazione fondamentale per la conservazione, allo stato stazionario, dello spettro del moto ondoso lungo il raggio d'onda è data dall'Equazione 82.

$$\left(C_{ga}\right)_{i} \frac{\partial}{\partial x_{i}} \frac{C_{a}C_{ga}\cos(\mu - \alpha)E(\omega_{a}, \alpha)}{\omega_{r}} = \sum \frac{S}{\omega_{r}}$$

Equazione 82 Equazione fondamentale per la conservazione allo stato stazionario dello spettro del moto ondoso lungo il raggio d'onda

Dove:

E è la densità dell'energia d'onda divisa da $(\rho_w g)$, dove ρ_w è la densità dell'acqua;

S rappresenta i termini di source e di sink di energia.

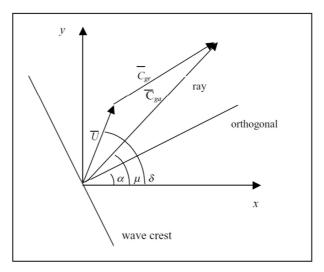


Figura 66 Schema dei vettori delle onde e delle correnti

12.2.1 Rifrazione e shoaling

La rifrazione e lo *shoaling* sono implementati in STWAVE applicando la conservazione del moto ondoso lungo i raggi tracciati in precedenza. I raggi sono tracciati a tratti da una colonna della griglia alla successiva. Gli spettri delle onde bidimensionali sono inseriti come input lungo la prima colonna della griglia (limite *offshore*). Per un punto nella seconda colonna della griglia, lo spettro è calcolato tracciando verso dietro un raggio per ogni componente di frequenza e direzione dello spettro. La direzione del raggio, μ , è determinata dall'Equazione 80. Sono inclusi solo i raggi che si propagano verso la spiaggia(da -87.5 a +87.5 deg).

Il raggio d'onda è tracciato verso dietro fino alla colonna precedente e viene calcolato il segmento del raggio DR. Sono stimate le derivate della profondità e della corrente rispetto alla direzione normale all'ortogonale dell'onda (prendendo la direzione dell'ortogonale nella seconda colonna), e vengono sostituite nell'Equazione 81 per calcolare la direzione ortogonale all'onda nella prima colonna. Quindi vengono calcolati il numero delle onde, la celerità d'onda e di gruppo ed il raggio d'onda della colonna precedente. L'energia viene quantificata come la media pesata dell'energia tra due punti della griglia adiacenti nella colonna. La densità di energia è corretta con un fattore che è il rapporto tra la larghezza di una banda standard di 5 deg e la larghezza della banda tracciata verso dietro, per tener conto del differente incremento angolare del raggio tracciato verso dietro. L'energia dell'onda che ha subito *shoaling* e rifrazione nella seconda colonna viene calcolata grazie alla conservazione del moto ondoso lungo il raggio (Equazione 82).

Se c'è una corrente forte in opposizione, le onde possono essere bloccate dalla corrente nel caso in cui la celerità di gruppo relativa sia più piccola della corrente in opposizione. In questo caso l'energia dell'onda non può propagarsi contro la corrente.

12.2.2 Diffrazione

La diffrazione è inclusa nel modello STWAVE con uno "smussamento" dell'energia dell'onda. Il modello "smussa" l'energia di una data banda di frequenza e direzione utilizzando la formula riportata nell'Equazione 83.

$$E_{j}(\omega_{a},) = 0.55E_{j}(\omega_{a},\alpha) + 0.225[E_{j+1}(\omega_{a},\alpha) + E_{j-1}(\omega_{a},\alpha)]$$
Equazione 83

Dove:

E è la densità di energia in una data banda di frequenza e direzione;

"j" in pedice indica l'indice della riga della griglia (posizione lungo la linea di costa).

L'Equazione 83 provoca lo smussamento dei forti gradienti di altezza d'onda, ma non provoca deviazioni delle onde. Questa formulazione dipende dalla griglia spaziale e questo rappresenta un punto di debolezza del modello.

12.2.3 Termini source – sink

Frangimento delle onde nella surf zone

Il criterio di frangimento applicato nella prima versione di STWAVE(Equazione 84) è una funzione del rapporto tra l'altezza d'onda e della profondità.

$$\frac{H_{mo_{max}}}{d} = 0.64$$

Equazione 84 Criterio di frangimento

Dove:

H_{m0} è l'altezza significativa misurata con l'analisi spettrale.

Avvicinandosi a costa, dove le onde diventano più ripide, aumentano le probabilità che avvenga il frangimento. Smith, Resio e Vincent nel 1997 fecero degli esperimenti in laboratorio riguardo al frangimento di onde irregolari e trovarono che una relazione di frangimento espressa come il criterio di Miche (Equazione 85) era semplice, robusta ed accurata.

$$H_{m0_{max}} = 0.1L \tanh kd$$

Equazione 85 Criterio al frangimento di Miche (1951)

L'Equazione 85 è utilizzata nella Versione 3.0 di STWAVE come massimo limite dell'altezza d'onda di momento zero.

L'energia nello spettro è ridotta per ogni frequenza e direzione in proporzione all'ammontare dell'energia pre – frangimento per ogni banda di frequenza e direzione. Il trasferimento di energia non lineare ad alte frequenze non viene rappresentato nel modello. Le celle della griglia del modello nelle quali l'altezza è limitata dall'Equazione 85 sono segnalate come celle attive.

Input dai venti

Le onde crescono per il trasferimento del momento dal campo del vento al campo delle onde. Il flusso dell'energia, F_{in}, nel campo delle onde è dato in STWAVE dall'Equazione 86:

$$F_{in} = \lambda \frac{\rho_a}{\rho_w} 0.85 C_m \frac{u_*^2}{g}$$

Equazione 86 Flusso di energia entrante nel campo delle onde (D. T. Resio 1988a)

Dove:

 λ è il coefficiente di partizione che rappresenta la percentuale del momento totale trasferito dall'atmosfera all'acqua che va direttamente al campo delle onde;

ρ_a è la densità dell'aria;

C_m è la velocità media delle onde;

 u_* è la velocità di attrito (uguale al prodotto della velocità del vento, U, e della radice quadrata del coefficiente di attrito, C_D =0.0012+0.000025U).

In acque profonde STWAVE prevede una crescita di energia totale che è coerente con Hasselmann, et al. (1973).

L'energia che raggiunge lo spettro è calcolata moltiplicando il flusso di energia per il tempo equivalente che le onde impiegano per propagarsi attraverso una cella della griglia, riportato nell'Equazione 87.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\beta C_{g_{media}} \cos \alpha_m}$$

Equazione 87 Tempo equivalente che le onde impiegano per propagarsi attraverso una cella della griglia

Dove:

Δt è il tempo equivalente di propagazione;

Δx è la spaziatura della griglia;

 β è un fattore, che in caso delle onde da vento è pari a 0.9;

 $\mathcal{C}_{g_{media}}$ è la velocità di gruppo media per lo spettro;

 α_m è la direzione media delle onde, relativa alla griglia.

Poiché STWAVE è un modello mezzo piano, sono inclusi solo i venti che si propagano verso la spiaggia.

Interazione onda – onda e whitecapping

L'energia delle onde proviene dal vento, ma viene redistribuita attraverso l'interazione non lineare onda – onda. L'energia viene trasferita dal picco dello spettro alle frequenze più basse ed alle alte frequenze, dove viene dissipata.

Nell'STWAVE la frequenza di picco cresce con l'area di *fetch*. L'Equazione 88 riporta il tasso di questo cambiamento di f_p.

$$(f_p)_{i+1} = \left[(f_p)_i^{7/3} - \frac{9}{5} \zeta \left(\frac{u_*}{g} \right)^{4/3} \Delta t \right]^{-3/7}$$

Equazione 88 Tasso del cambiamento della frequenza di picco con l'area di fetch

Dove:

i e i+1 come pedici indicano gli indici della griglia di STWAVE;

ζè una costante adimensionale (Resio e Perrie 1989).

L'energia guadagnata dallo spettro viene ridistribuita tra le frequenze della sua parte anteriore (frequenze più basse della frequenza di picco) in modo da mantenere una forma dello spettro simile a quella originale.

L'energia d'onda è dissipata attraverso il trasferimento di energia alle alte frequenze (osservabile maggiormente in campi di onde attive che stanno crescendo), il frangimento (whitecapping) e gli effetti viscosi – turbolenti. C'è un equilibrio dinamico tra l'energia che entra nel campo delle onde per input dal vento e l'energia che lascia il campo a causa di flussi non lineari verso alte frequenze (D. Resio 1987, 1988a). Il flusso di energia verso le alte frequenze è rappresentato in STWAVE come riportato nell'Equazione 89.

$$\Gamma_E = \frac{\varepsilon g^{1/2} E_{tot}^3 k_p^{9/2}}{\tanh^{3/4} (k_p d)}$$

Equazione 89 Flusso di energia verso le alte frequenze (D. Resio 1987)

Dove:

 Γ_E è il flusso di energia;

εè un coefficiente pari a 30;

 E_{tot} è l'energia totale presente nello spettro divisa per (ρ_w g);

 k_p è il numero di onde associato al picco dello spettro.

La perdita di energia dallo spettro è calcolata moltiplicando il flusso di energia per il tempo equivalente che impiega l'onda a propagarsi attraverso una cella della griglia (Δt nell'Equazione 87), con β pari a 0.1 per la porzione di *swell* dello spettro e 0.9 per la porzione di onde da vento dello spettro. Questa dissipazione è inclusa nel modello solo se l'input wind è incluso.

Gradienti di radiation stress

I gradienti di *radiation stress* sono calcolati in STWAVE per permettere alle onde di forzare i modelli di circolazione esterna per guidare i cambiamenti delle correnti vicine alla costa e del livello dell'acqua (*wave set up* e *set down*). Le correnti guidate dalle onde sono generalmente le forze dominanti per il trasporto del sedimento nella *surf zone*. I tensori di *radiation stress* sono calcolati basandosi sulla teoria lineare delle onde (Equazione 90, Equazione 91 e Equazione 92).

$$S_{xx} = \rho_w g \iint E(f,\alpha) \left[0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) (\cos^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] df d\alpha$$
 Equazione 90
$$S_{xy} = \rho_w g \iint \frac{E(f,\alpha)}{2} \left[0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \sin 2\alpha \right] df d\alpha$$
 Equazione 91
$$S_{yy} = \rho_w g \iint E(f,\alpha) \left[0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) (\sin^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] df d\alpha$$
 Equazione 92

I gradienti di *radiation stress* si possono calcolare come riportato nell'Equazione 93 e nell'Equazione 94.

$$\tau_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}$$

Equazione 93

$$\tau_y = -\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}$$

Equazione 94

I valori di τ_x/ρ_x e τ_y/ρ_y sono output di STWAVE che vengono usati per i modelli di circolazione.

12.3 Discretizzazione numerica

STWAVE è un modello numerico differenziale con soluzioni limitate, formulato su una griglia cartesiana. Le celle della griglia sono quadrate ($\Delta x=\Delta y$). In Figura 67 è riportato uno schema della griglia.

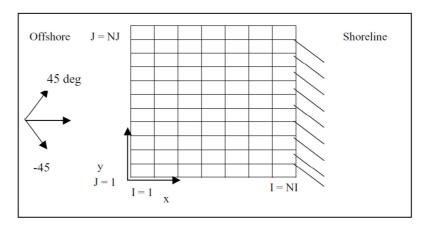


Figura 67 Schema della griglia numerica in STWAVE (Smith, Sherlock e Resio 2001)

STWAVE opera in un sistema di coordinate locali, con l'asse x orientato in direzione *cross* – *shore* e l'asse y orientato lungo la linea di costa (l'origine è *offshore*), formando un sistema di coordinate destro, che ci può osservare in Figura 67. Per un osservatore sulla costa rivolto verso il mare l'origine degli assi si trova a sinistra.

L'orientamento dell'asse x definisce un mezzo piano che è rappresentato nel modello. L'asse y è tipicamente allineato con i contorni del fondo. L'angolo delle onde è dato dall'angolo formato in senso orario con l'asse x.

I contorni laterali del modello possono essere definiti come terra o acqua specificando la profondità delle celle come positiva (acqua) o negativa (terra). Ovviamente i due diversi tipi di limiti laterali forniscono soluzioni molto diverse tra loro a parità di condizioni. Infatti i margini caratterizzati dalla terra, riducono molto la crescita delle onde vicino al margine perché bloccano la propagazione. Se i margini sono rappresentati da acqua allora l'energia può propagarsi entrando o uscendo dai margini.

12.4 Descrizione dei file di input di output

STWAVE necessita di quattro input principali:

- Parametri del modello. Devono essere inseriti dei parametri fondamentali per la simulazione: il livello dell'acqua, il vento e le opzioni delle griglie parent o nested.
 Inoltre viene fornito il file delle stazioni, creato con Grid Generator, che definisce i punti selezionati per i quali verranno forniti in output i dati delle onde propagate.
- Batimetria. Viene fornita tramite l'inserimento del dominio spaziale, che viene creato con Grid Generator. Il file di input indica anche l'ampiezza delle griglie e del dominio stesso.
- Spettro onde incidenti. Viene fornito lo spettro bidimensionale delle onde incidenti, che rappresenta la densità dell'energia come funzione della frequenza e della direzione. Lo spettro viene creato con SPECGEN. Il singolo spettro in input viene utilizzato per l'intero dominio spaziale.
- Campi della corrente. Nel caso in cui la corrente rappresenti un fattore notevolmente influente è necessario inserire anche i file della corrente. Nel caso oggetto di studio non è stato inserito questo tipo di input.

I file di output del modello STWAVE sono:

- Configuration file. Il file dove sono contenuti tutti i parametri utilizzati per la simulazione.
- File delle stazioni, che quindi è sia di input che di output. Nel file delle stazioni in output sono contenuti gli spettri delle onde propagate nelle stazioni definite dal file di input. Tali spettri hanno le caratteristiche dello spettro fornito in input. Vi sono inoltre i parametri delle onde che passano nelle celle dove sono situate le stazioni. Questi parametri sono H_{m0} , T_P , e la direzione media delle onde α_m .

• *Field file*. In questo file si trovano i parametri delle onde si trovano anche nello station file, ma riferiti a tutte le celle. Inoltre nel *field file* sono segnalate le celle dove avviene frangimento e per ogni cella viene riportato il gradiente di *radiation stress* (Smith, Sherlock e Resio 2001)

.

13Applicazione del modello numerico

13.1 Architettura di CEDAS - Beach

Il software GENESIS, che è stato utilizzato per la realizzazione del modello per la simulazione della morfodinamica della linea di riva all'interno dell'unità fisiografica analizzata, fa parte del pacchetto Nemos (Nearshore Evolution MOdeling System) all'interno della sezione Beach di Cedas (Coastal Engineering Design and Analysis System 4.0). Gli altri software utilizzati che si trovano nel medesimo pacchetto sono: Grid Generator, WWWL Data, WSAV, SPECGEN, STWAVE Configuration, e WMV. Essi sono stati utilizzati per l'elaborazione di tutti gli input che devono essere forniti a GENESIS per effettuare le simulazioni. L'affidabilità di GENESIS dipende dalla qualità dei dati in input. La fatica maggiore nella modellizzazione comprende la raccolta, l'interpretazione, la formattazione e l'inserimento dei dati nei file di input.

Grid Generator è il software che si utilizza per l'inserimento dei dati batimetrici e della linea di riva, come ASCII XYZ ("*.txt"); che poi vengono triangolati. Inoltre premette di definire, controllare e modificare la griglia di calcolo numerico ed il dominio spaziale. Si possono specificare le posizioni delle stazioni automaticamente e si possono controllare o modificare. I file che il software restituisce come output sono: la griglia ("*.grd"), il dominio spaziale di GENESIS (*.nc), il file delle stazioni ("*.nc") ed il dominio spaziale dei modelli di trasformazione delle onde ("*.nc").

WWWL (Wave Time Series) Data è il software che è necessario per analizzare i dati di moto ondoso *offshore*, per flaggarli e contestualizzarli dal punto di vista spaziale e temporale. Il dato in input è rappresentato da un file ASCII XYZ "*.txt" che contiene i dati triorari delle onde. L'output è rappresentato dal file di moto ondoso filtrato ("*.nc").

WSAV viene utilizzato per suddividere i dati di moto ondoso in una matrice di frequenza delle permutazioni di moti ondosi da utilizzare per le simulazioni numeriche. L'input è il file di moto ondoso filtrato ("*.nc")e viene prodotto il *permutation file* ("*.nc"), inoltre si salva il file delle specifiche di analisi ("*.wsv").

SPECGEN si utilizza per visualizzare gli spettri direzionali del moto ondoso analizzato con i software precedenti. Il file di input è il *permutation file* ("*.nc"), mentre l'output è lo spettro, che ha formato "*.sgn"

STWAVE è il software che permette l'analisi del cambiamento dei parametri del moto ondoso nella propagazione da largo a costa. I file di input sono: il dominio spaziale dei modelli di trasformazione delle onde ("*.nc"), lo spettro del moto ondoso ("*.sgn"), il field file ("*.nc"), il file delle stazioni ("*.nc"), che è sia un input che un output ed il printout file ("*.prt"). Si deve salvare il file della configurazione che ha estensione "*.stw". I risultati della simulazione possono essere visualizzati con il software WMV (Wave Model Visualization), inserendo il field file ed il file delle stazioni.

GENESIS per la simulazione della linea di riva necessita di input elaborati attraverso tutti i software che sono stati elencati in precedenza: il dominio spaziale di GENESIS ("*.nc"), il file di moto ondoso filtrato ("*.nc"), il visualization file ("*.nc"), che viene creato ex novo e che costituisce anche un output ed il file delle stazioni ("*.nc"), oltre che le condizioni al contorno e le linee di riva. Prima di lanciare la simulazione ed osservare i risultati si deve salvare la configurazione come file "*.gen". I risultati della simulazione sono: il cambiamento della linea di riva, il tasso di trasporto solido *longshore* e le caratteristiche delle onde al frangimento. In Figura 68 si può osservare uno schema riassuntivo della struttura del software Nemos e delle sue relazioni interne, nei rettangoli sono riportati i diversi file, mentre negli ovali sono riportati i software impiegati.

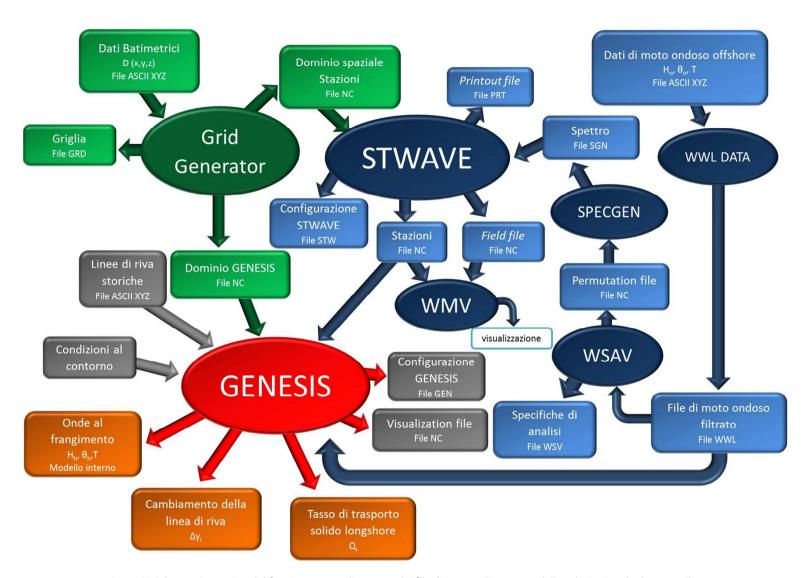


Figura 68 Schema riassuntivo del funzionamento di Nemos, dei file di input e di output e delle relazioni tra le diverse utility

13.2 Impostazioni delle directory e gestione dei dati per l'implementazione del modello

Durante la implementazione del modello si trattano numerosi dati in tanti formati diversi e pertanto risulta fondamentale avere una precisa e chiara disposizione di essi all'interno delle directory nel computer su cui si lavora, in modo da agevolare le operazione di pre processing dei dati.

Innanzitutto è necessario creare una cartella principale in cui sarà inserito tutto ciò che riguarda il modello e che è chiamata con il nome identificativo del sito a cui fa riferimento seguito dall'anno in cui è stato svolto il lavoro, ad esempio: CarraraViareggio_2012, espressione che nel seguente testo sarà genericamente riportato come Sito_Anno.

La cartella principale ha due sottocartelle che sono "Data" e "Work".

In "Data" devono essere inseriti tutti i file contenenti i dati di partenza, come i dati da onda ed i dati riguardanti le batimetriche e la linea di riva del sito, che possono essere suddivise in due ulteriori sottocartelle "Onde" e "Batimetrie". In essa devono anche essere inseriti tutti file di input – output che vengono scambiati tra le diverse utility di Nemos. Di seguito si riportano i file che vi vengono inseriti con il nome che li viene attribuito:

il dominio spaziale di STWAVE
 il file delle stazioni
 Sito_Anno_SPD.nc
 Sito_Anno_STA.nc

• il dominio spaziale di GENESIS Sito_Anno_SPD_GEN.nc

• file di moto ondoso filtrato WWL1_FLAG.nc

spettro del moto ondoso
 SPECGEN_WWL1_FLAG.sgn

• field file Sito_Anno.fld.nc

printout file di STWAVE Sito_Anno.prt

nella cartella "Work" vengono inseriti i diversi file delle specifiche e delle configurazioni delle analisi e delle simulazioni svolte dai sofware. Di seguito si riportano i file che vengono inseriti in questa cartella:

dati batimetrici *.xyz

• la griglia spaziale Sito_Anno.grd

specifiche delle analisi di WSAV
 WSAV1 FLAG.wsv

• configurazione delle simulazioni di STWAVE Sito_Anno.stw

• visualization file Sito_Anno_GEN_vis.nc

configurazione GENESIS Sito_Anno.gen

13.3 Step fondamentali per l'impostazione del modello

Nella Tabella 3 sono riportati i passaggi fondamentali per l'impostazione del modello. I colori utilizzati fanno riferimento alla Figura 68.

Creazione del supporto cartografico digitale

- Digitalizzazione delle carte nautiche scannerizzate con Image Rectifier per le batimetriche maggiori di 10 m
- •Acquisizione dei rilievi diretti per le batimetriche inferiori a 10 m
- •Importazione dei punti sul supporto cartografico su AutoCAD con IMPORTXYZ.lsp

Determinazione del dominio spaziale di interesse

- Considerazione delle caratteristiche geomorfologiche dell'area, delle principali traversie delle onde e degli effetti al margine dei modelli numerici
- •Identificazione del dominio spaziale di interesse sul supporto cartografico digitale in AutoCAD

Creazione della batimetria su Grid Generator

- •Importazione dei dati batimetrici del dominio esportati da AutoCAD
- •Scelta sistema di coordinate e dato verticale, triangolazione dei dati

Creazione della griglia di calcolo su Grid Generator

- •Inserimento dei dati della griglia ottenuti da AutoCAD in Grid Generator
- •Visualizzazione della griglia in 3D

Creazione della griglia di calcolo di GENESIS

- •Inserimento del punto di origine della griglia con il mouse
- •Inserimento tramite la finestra di dialogo delle caratteristiche della griglia e delle stazioni
- •Salvataggio di tutti i file che sono stati creati

Creazione delle condizioni di moto ondoso offshore con WWL DATA

- •Importazione dei dati di moto ondoso offshore in WWL
- Contestualizzazione spaziale e temporale dei dati di moto ondoso, inserimento della convenzione utlizzata per la direzione delle onde

Analisi delle condizioni di moto ondoso offshore con WWL DATA e WSAV

- Filtraggio dei dati di moto ondoso per altezza, periodo e direzione
- •Suddivisione delle onde in bande per altezza periodo e direzione
- Analisi del moto ondoso
- •Salvataggio del permutation file e delle specifiche delle analisi
- •Visualizzazione dei risultati delle analisi

Propagazione del moto ondoso da largo a costa con STWAVE

- Configurazione della propagazione del moto ondoso da largo a costa, impostazione di tutti i file di input e di output
- •Salvataggio delle specifiche di analisi e simulazione

Creazione dello spettro con SPECGEN

- •Importazione dei file del moto ondoso analizzati
- •Impostazione dei parametri dello spettro
- Visualizzazione e salvataggio dello spettro

Visualizzazione dei dati di modo ondoso propagati a costa con WMV

- •Importazione del field file e del file delle stazioni
- •Visualizzazione della propagazione dei singoli eventi ondosi

Configurazione di GENESIS

- •Importazione del dominio spaziale di GENESIS
- •Configurazione del modello
- •Importazione del file di moto ondoso flaggato e del file delle stazioni
- •Impostazione dei file di output: visualization file

Impostazione delle condizioni al contorno e delle linee di riva su GENESIS

- •Impostazione dei limiti in direzione offshore e verso terra
- •Impostazione dei limiti laterali
- •Importazione della linea di riva
- •Importazione delle strutture nel modello
- Calibrazione del trasporto solido

Simulazione della linea di riva su GENESIS

- •Salvataggio del file della configurazione
- Avvio della simulazione

Visualizzazione dei risultati della simulazione

- •Cambiamento della linea di riva
- Trasporto solido longshore
- Condizioni del moto ondoso al frangimento

Tabella 3 Operazioni sequenziali per l'impostazione del modello

Ogni step sarà spiegato approfonditamente nei paragrafi successivi.

13.4 Creazione del supporto cartografico digitale

Il primo input necessario per applicare il modello GENESIS è il rilievo batimetrico dell'area da analizzare. Per ottenere questo input, parte dei dati, per fondali con profondità maggiori di 10 m, sono stati ottenuti tramite digitalizzazione delle carte nautiche dell'area mentre per fondali minori sono stati utilizzati rilievi diretti.

Nelle carte nautiche dell'area di interesse è stato tracciato il reticolo geografico di interesse DTM – UTM 32, esse poi sono state scannerizzate, ottenendo dei file bitmap come quello in Figura 69.

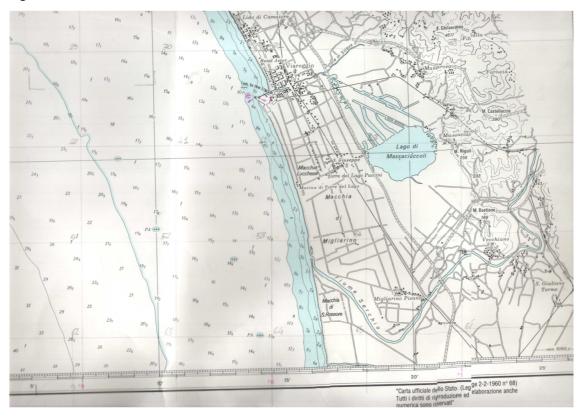


Figura 69 Scannerizzazione della carta nautica

Le immagini ottenute sono state elaborate con l'utilizzo di Image Rectifier, un software che fa parte del pacchetto MIKE 21. Attraverso il comando "Specify Target Point" si selezionano ad uno ad uno tutti i nodi del reticolo DTM – UTM 32 che erano stati tracciati sulla carta prima della scannerizzazione ed il programma permette di assegnare loro le coordinate reali attraverso un'apposita finestra che si apre dopo la selezione, come mostrato in Figura 70.

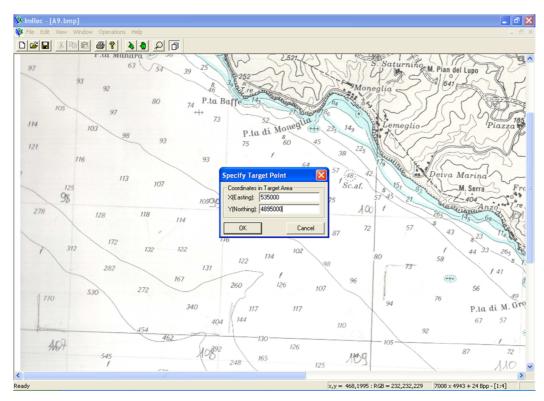


Figura 70 Comando "Specify Target Point" interfaccia Image Rectifier di MIKE21

Dopo che a tutti i nodi del reticolo sono state assegnate le coordinate reali, si effettua la triangolazione dei punti tracciati attraverso il comando "Operations →Rectification of 2nd order". Tale elaborazione permette di correggere le eventuali distorsioni ottiche e di georeferenziare le carte, ottenendo delle immagini come quella mostrata in Figura 71.

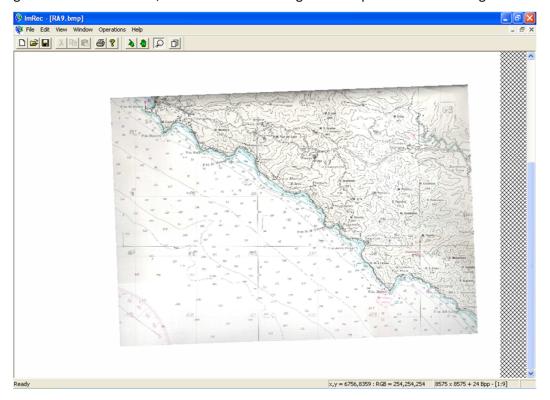


Figura 71 Immagine retificata e georeferenziata con Image Rectifier di MIKE21

Image Rectifier è in grado di restituire in output anche un documento di testo con estensione "*.txt" che contiene l'insieme delle coordinate x, y, z di tutti i punti presenti nelle carte. Questo insieme di coordinate sono state traferite sul software AutoCAD attraverso l'utilizzo di un file LISP: IMPORTXYZ (Sanders 2012). Il file che contiene le coordinate dei punti per essere caricato con tale file LISP deve avere estensione "*.txt" e deve avere le coordinate disposte in colonne divise da una virgola ed i decimali devono essere separati con il punto. Il LISP deve prima essere caricato su AutoCAD "Strumenti AutoLisp Carica Applicazione", successivamente si attiva digitando il comando IMPORTXYZ.. Compare una finestra interfaccia utente, mostrata in Figura 72. Dopo aver selezionato il file contente le coordinate dei punti che si vogliono importare "Browse for file" si indicano quante posizioni decimali devono essere riportate "Decimal Places to Display" e si clicca su "Get XYZ Coords" per visualizzare un anteprima dei dati che verranno importati. A questo punto è possibile selezionare il layer su cui si vuole che vengano inseriti i punti e se si vuole che vengano importati come nodi, centri di cerchi, linee, ecc...

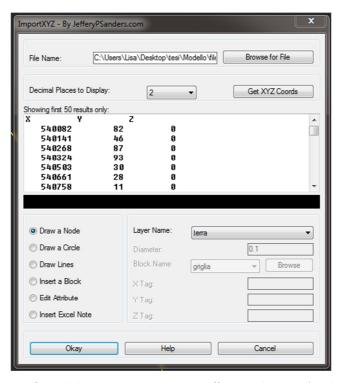


Figura 72 Interfaccia del AutoLisp IMPORTXYZ By JefferyPSanders.com (Sanders 2012)

Sul supporto cartografico ottenuto su AutoCAD linee batimetriche sono rappresentate da un insieme di punti e la linea di costa da una polilinea (Figura 73). Durante tutto il processo di elaborazione degli input, di simulazione e rappresentazione dei risultati è necessario mantenere un continuo scambio di dati tra i software del pacchetto Nemos ed Autocad, che risultano complementari.

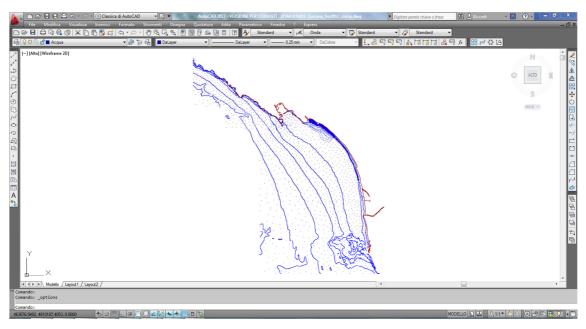


Figura 73 Cartografia dell'area di interesse sull'interfaccia Autocad 2012 (student license)

13.5 Determinazione del dominio spaziale d'interesse

A questo punto è stato identificato il "dominio d'interesse" (in magenta in Figura 74), definito come la porzione spaziale della costa per la quale si necessita che il modello offra dei dati il più possibile corretti; al suo margine si hanno dei risultati approssimati e non completamente corretti a causa dei difetti nella implementazione numerica delle condiziono al bordo che affliggono qualsiasi modello. In quei tratti, infatti, agisce nella realtà anche una notevole quantità di onde che non vengono considerate dal modello, perché provengono da una zona offshore che non è compresa nel dominio

In seguito viene riportato il procedimento che è stato seguito per identificare il dominio d'interesse:

- S'individua cartograficamente il tratto di costa che interessa lo studio, considerando circa 1 km di tolleranza per ogni estremità;
- 2. Si determina una retta secondo la quale orientare il dominio: se il tratto di costa è relativamente ridotto (20 km) ed ha un'orientazione uniforme allora si traccia la congiungente tra i due estremi, che rappresenterà direttamente la retta d'interesse. Se il tratto di costa ha invece una lunghezza considerevole e non ha orientazione omogenea, allora si deve individuare il punto medio e tracciare le due congiungenti tra questo e gli estremi del tratto di costa (in celeste in Figura 74). La retta d'interesse avrà, quindi, una pendenza media tra quelle delle due congiungenti.
- Dal punto intermedio si tracciano le tangenti agli elementi morfologici di confine.
 Queste due direzioni identificano i settori di traversie delle onde che sono più

- determinanti in quel tratto di costa. Le due rette devono poi essere traslate ai margini del tratto di costa (in verde in Figura 74).
- 4. Il limite *offshore* del modello deve comprendere profondità maggiori di 100 m, perché in questo modo si ha la certezza che per tutte le onde (fino a circa 10-12s di periodo) al margine del dominio d'interesse si abbiano condizioni di acque profonde. In questo punto le onde devono essere svincolate dalla profondità del fondale. Il limite *offshore* deve essere orientato parallelamente alla retta individuata nel punto 1.
- 5. S'individua dove le due rette delle traversie, tracciate in precedenza, intersecano il limite *offshore*, se in quel punto il fondale è troppo basso si sposta arbitrariamente il limite più al largo. Le intersezioni segnalano il margine *offshore* ed i due limiti laterali.
- 6. Il limite verso terra deve trovarsi dietro ad ogni punto della linea di costa, in modo tale da poter modellare adeguatamente gli eventuali arretramenti della stessa. Solitamente il confine è fissato a una distanza non troppo elevata dalla costa, proporzionale alla dimensione delle maglie della griglia che s'intende utilizzare.

Il dominio spaziale viene caratterizzato da un sistema di riferimento di assi cartesiani che varia orientazione a seconda del software utilizzato.

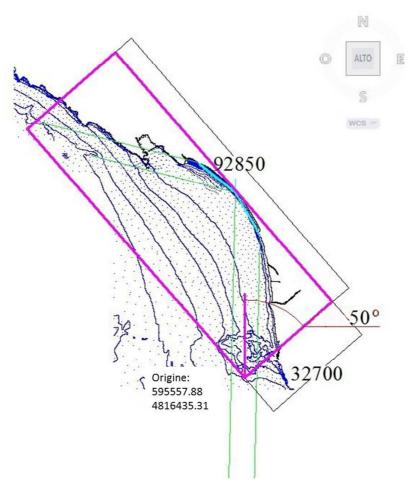


Figura 74 Creazione del dominio spaziale di riferimento del modello

13.6 Creazione dell'andamento batimetrico, della griglia di calcolo e della linea di riva del dominio d'interesse su Nemos

Dal file di AutoCAD si esportano i punti della carta interni al dominio di interesse attraverso il software DXF2XYZ 2.0. Tale programma crea un file ASCII XYZ con estensione "*.xyz" contente le coordinate dei punti che si trovano all'interno di un qualsiasi file con estensione "*.dxf" Quindi prima è necessario creare dei file "*.dxf" contenenti i punti delle batimetriche e della linea di riva interni al dominio. Successivamente si accede all'interfaccia del software (Figura 75) e si seleziona il file "*.dxf" di interesse con "Cerca in:", si controlla che i filtri "Entities", "Layers", "Pens" e "Region" corrispondano al risultato voluto e si seleziona l'output desiderato con "Output format", infine si clicca su "Save *.xyz".

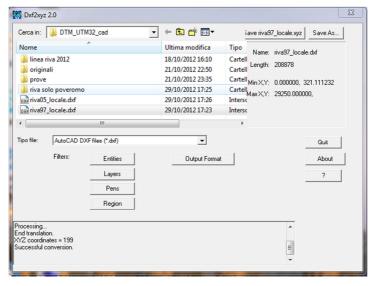


Figura 75 Interfaccia di DXF2XYZ 2.0

Questo file modificato in modo da avere un testo diviso in tre colonne da delle tabulazioni, nelle prime due colonne ci sono le coordinate e nella terza c'è la quota, come mostrato in Figura 76, i decimali sono separati da una virgola.

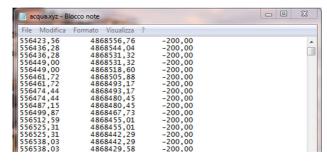


Figura 76 File "*.xyz" da inserire su Grid Generator

Il file xyz viene importato sul software Grid Generator facente parte del pacchetto Nemos "Edit-Import Data". Dopo che i dati vengono importati il software richiede di inserire il sistema di riferimento, definito in questo caso su locale, ed il dato verticale, impostato come MSL (Mean Sea Level) attraverso due finestre di dialogo riportate in Figura 77.

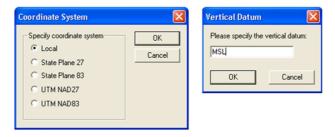


Figura 77 Finestra di dialogo di Grid Generator (Nemos)

I punti trasposti (Figura 78) vengono interpolati per triangolazione "Edit→ Triangulate" per ottenere l'andamento batimetrico (Figura 79).

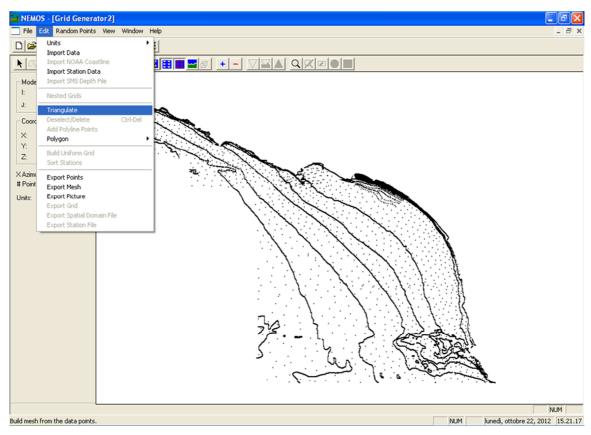


Figura 78 Punti importati in Grid Generator (Nemos)

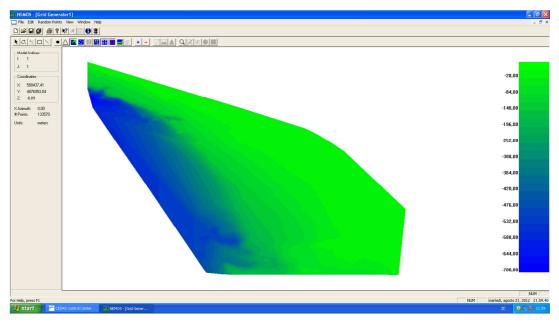


Figura 79 Andamento batimetrico dell'area di interesse, interfaccia di Grid Editor (Nemos)

Successivamente si forniscono al software i dati per definire il sistema di riferimento e la griglia del dominio che verrà utilizzata per il software STWAVE attraverso l'interfaccia riportata in Figura 80. Questi dati vengono rilevati dal dominio di interesse che è stato definito in precedenza sul supporto cartografico su AutoCad, come descritto nel relativo paragrafo. Il sistema di riferimento di STWAVE ha origine nel punto di incrocio degli assi del dominio offshore, a sinistra dell'osservatore che guarda il mare. L'asse y segue l'andamento parallelo alla linea di costa, mentre l'asse x si estende perpendicolarmente verso la linea di riva. Nel caso preso in esame la griglia di calcolo ha origine nel punto di coordinate 4816435.31 m N e 595557.88 m E. L'estensione dell'asse x è di 32700 m, mentre quella dell'asse y è 92850 m. L'azimuth, ovvero l'angolo misurato in senso orario tra il nord e il semiasse positivo delle x, è 50° (Figura 74). L'inserimento del sistema di riferimento permette di visualizzare l'andamento batimetrico in 3D nella griglia uniforme di calcolo (Figura 81). Le dimensioni delle maglie della griglia di calcolo sono state impostate a 100 m.

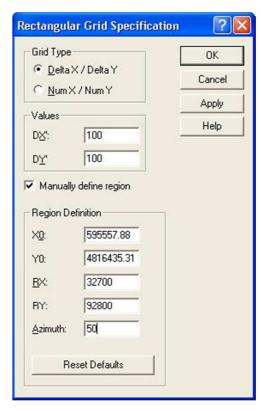


Figura 80 Interfaccia di Grid Generator - Nemos per inserire i dati per la definizione della griglia di calcolo

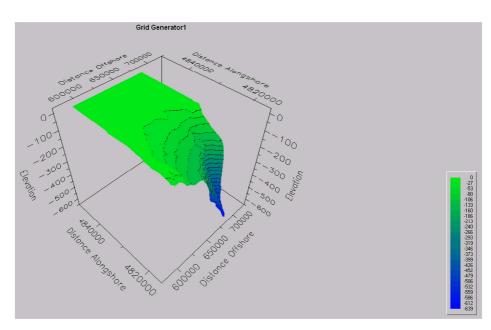


Figura 81 Visualizzazione in 3D dell'andamento batimetrico

Si inserisce poi la linea di riva sulla quale deve essere svolta la simulazione, come file di testo con estensione "*.xy" contente l'insieme delle coordinate x y della linea di riva, sempre ottenuto da AutoCAD mediante il software DXF2XYZ.

13.7 Creazione della griglia di calcolo di GENESIS

Nella fase successiva si imposta la griglia di calcolo che verrà utilizzata da GENESIS utilizzando il comando "Define GENESIS Grid", che si attiva cliccando sul pulsante che è evidenziato in rosso in Figura 83. Questa funzione permette di collocare direttamente con il mouse nella griglia creata il punto di origine del sistema. Tale punto di origine coincide con il punto medio della prima cella, che è interno alla linea di riva. L'asse x si estende lungo la linea di riva verso la destra dell'osservatore che guarda il mare aperto, mentre l'asse y è in direzione offshore. In Figura 82 sono mostrati i diversi orientamenti dei sistemi di assi di GENESIS e STWAVE rispetto alla linea di riva considerata.

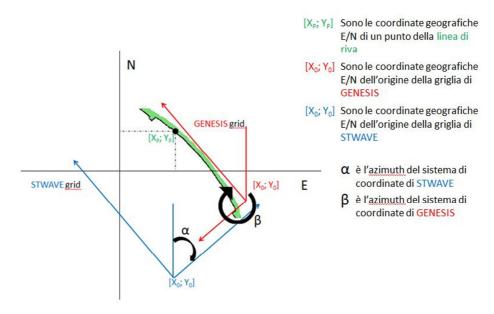


Figura 82 Orientazioni dei sistemi di riferimento di GENESIS e STWAVE rispetto alla linea di riva

Dopo che la griglia di GENESIS è stata collocata nel dominio appare una finestra di dialogo, mostrata in Figura 83. In essa sono riportate le coordinate dell'origine del sistema che è stata collocata con il mouse ,nel caso di studio 4858525.5 m N, 603155.84 m E. Nella medesima finestra si impostano la distanza tra i *wall* delle celle di GENESIS e la lunghezza dell'asse x, nel caso in esame pari rispettivamente a 50 m e 26850 m. Si definisce inoltre la batimetrica in cui inserire le stazioni di calcolo, in questo caso 10 m, e la frequenza, pari ad una per ogni cella. Nell'inserire questi dati bisogna tenere presente che il numero massimo di celle che GENESIS può supportare è 600.

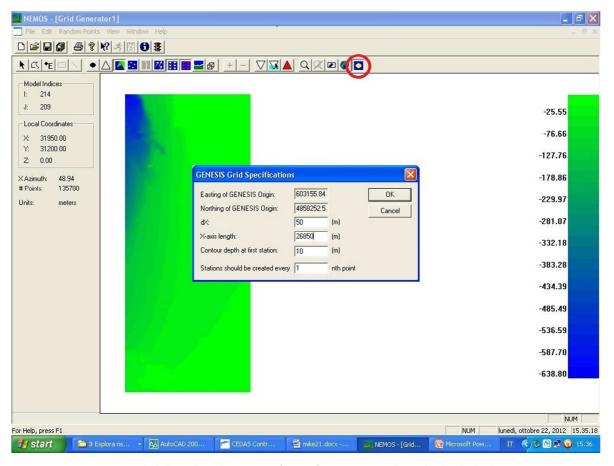


Figura 83 Finestra di dialogo di Grid Generator (Nemos) oer impostare la griglia di calcolo di GENESIS

In Figura 84 si può osservare la linea di riva (in bianco) e le stazioni (in celeste) come vengono visualizzate su Grid Generator dopo aver dato tutte le impostazioni. I dati che sono stati impostati su Grid Generator devono essere importati anche sul supporto cartografico di AutoCAD, in Figura 85 si osserva la griglia di GENESIS (in magenta).

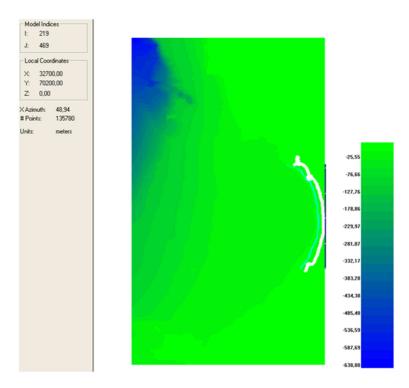


Figura 84 Visualizzazione della linea di riva e delle stazioni nella griglia generata su Grid Editor

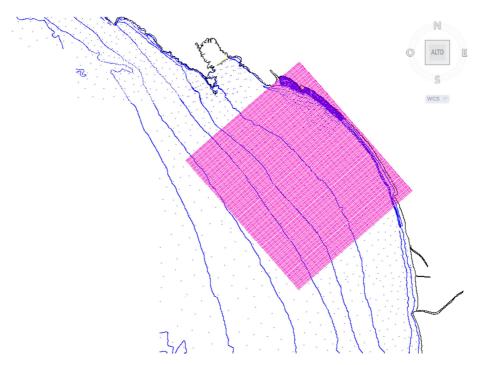


Figura 85 Griglia di GENESIS riportata su AutoCad

Da questa elaborazione effettuata su Grid Generator si ottengono dei file di output che sono la griglia di calcolo, che è un file con estensione "*.grd" e tre file con estensione "*.nc": il dominio spaziale di STWAVE, la distribuzione delle stazioni ed il dominio spaziale che verrà utilizzato per GENESIS.

13.8 Creazione delle condizioni di moto ondoso offshore

La fase successiva prevede la creazione delle condizioni di moto ondoso *offshore*, che viene realizzata con il software WWL Data. Vengono forniti in input i dati del moto ondoso derivanti dalla boa ondametrica di La Spezia (43° 55' 41.99" N, 9° 49' 36.01" E). Essa è situata sulla superficie di acqua con 90 m di profondità, la boa è di tipo DATAWELL Directional wavec MKI (www.idromare.it). I dati ondametrici utilizzati si riferiscono al range temporale che si estende dal 1 luglio 1989 al 25 aprile 2005 ed hanno un frequenza trioraria. Il numero totale di dati attesi era pertanto di 46224, mentre il numero di dati realmente presente era pari a 44397, pertanto la percentuale di dati mancanti ammonta a 3.95%.



Figura 86 Posizionamento della boa ondametrica di La Spezia (interfaccia Google Earth)

I dati vengono importati nel software come file di testo del tipo ASCII XYZ, dove ci sono 5 colonne: nella prima sono riportate le date dell'acquisizione del dato in formato "aaaammgg", nella seconda colonna ci sono gli orari in formato "hhmm", nella terza colonna sono riportate le altezze d'onda rilevate, nella quarta i periodi e nella quinta la direzione di provenienza dell'onda. La prima riga del documento riporta i dati generali delle misurazioni, in ordine devono trovarsi: il numero totale di misurazioni, i dati legati ad ogni tempo (nel caso in esame 2) poi si hanno tre posizioni in cui si pone 1 o 0 a seconda che siano inclusi o meno i Water Level, i Wave data ed i Wind Data (Figura 87).

| 🔼 dati onda | metrici l | a spezia | - Blocc | o note | | |
|---|-----------|---|--|---|--|--|
| File Modifica | Formato | Visualizza | ? | | | |
| 44397 2 19890701 19890701 19890701 19890701 19890701 19890701 19890701 19890702 19890702 19890702 19890702 19890702 19890702 | | 0 0 300 600 900 1200 1500 1500 2100 0 300 600 900 1200 | 1 0,6 0,4 0,4 0,4 0,3 0,3 0,3 0,3 0,8 0,9 0,7 | 0 36 5,9 5,9 5,9 4,3 4,3 4,3 4,3 5,3 6 5,3 | 234 238 235 234 249 242 237 217 220 194 209 228 234 231 | |

Figura 87 File ASCII XYZ in cui sono riportati i dati della boa ondametrica di La Spezia

I dati importati vengono visualizzati in una tabella riportata in Figura 88.

| NEMOS - | | | | | | | | | |
|-----------|----------|------|--------|--------|-----------|--|--|--|--|
| File Edit | | Help | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | A | В | С | D | E | | | | |
| 1 | Date | Time | Height | Period | Direction | | | | |
| 2 | 19890701 | 0 | 0,600 | 5,300 | 234,000 | | | | |
| 3 | 19890701 | 300 | 0,400 | 5,600 | 238,000 | | | | |
| 4 | 19890701 | 600 | 0,400 | 5,900 | 235,000 | | | | |
| 5 | 19890701 | 900 | 0,400 | 5,900 | 234,000 | | | | |
| 6 | 19890701 | 1200 | 0,400 | 5,600 | 249,00 | | | | |
| 7 | 19890701 | 1500 | 0,300 | 4,800 | 242,00 | | | | |
| 8 | 19890701 | 1800 | 0,300 | 4,300 | 237,00 | | | | |
| 9 | 19890701 | 2100 | 0,300 | 4,500 | 217,00 | | | | |
| 10 | 19890702 | 0 | 0,300 | 3,800 | 220,00 | | | | |
| 11 | 19890702 | 300 | 0,300 | 4,200 | 194,00 | | | | |
| 12 | 19890702 | 600 | 0,800 | 5,000 | 209,00 | | | | |
| 13 | 19890702 | 900 | 0,900 | 5,300 | 228,00 | | | | |
| 14 | 19890702 | 1200 | 0,700 | 5,600 | 234,00 | | | | |
| 15 | 19890702 | 1500 | 0,700 | 5,300 | 231,00 | | | | |
| 16 | 19890702 | 1800 | 0.500 | 5,000 | 231.00 | | | | |
| 17 | 19890702 | 2100 | 0,500 | 4,500 | 205,00 | | | | |
| 18 | 19890703 | 0 | 0,800 | 5,900 | 254,00 | | | | |
| 19 | 19890703 | 300 | 0,700 | 7,700 | 249,00 | | | | |
| 20 | 19890703 | 600 | 0,700 | 7,700 | 266,00 | | | | |
| 21 | 19890703 | 900 | 0,500 | 5,000 | 255,00 | | | | |
| 22 | 19890703 | 1200 | 0,400 | 5,000 | 257,00 | | | | |
| 23 | 19890703 | 1500 | 0.300 | 5.300 | 275.00 | | | | |
| 24 | 19890703 | 1800 | 0,200 | 6,300 | 267,00 | | | | |
| 25 | 19890703 | 2100 | 0.200 | 4.500 | 263,00 | | | | |
| 26 | 19890704 | 0 | 0.200 | 2,200 | 357,00 | | | | |
| 27 | 19890704 | 300 | 0,200 | 2,400 | 5.00 | | | | |
| 28 | 19890704 | 600 | 0.300 | 2,500 | 19.00 | | | | |

Figura 88 Tabella dati ondametrici nell'interfaccia di WWL Data in Nemos

Successivamente il software necessita dell'inserimento di input che contestualizzino i dati dal punto di vista spaziale e temporale: quanto è profonda l'acqua al di sotto della boa, la tipologia di dati verticali (MSL) ed orizzontali (locali), se i dati temporali sono riferiti a Greenwich, l'unità di misura dell'altezza d'onda e la convenzione che viene utilizzata per la direzione delle onde. Per determinare la direzione delle onde, infatti, possono esserci diverse convenzioni. Quella utilizzata nel caso in esame è la convenzione metereologica che prevede che venga misurato, in senso orario, l'angolo formato tra il nord e la direzione dalla quale proviene l'onda (Figura 89).

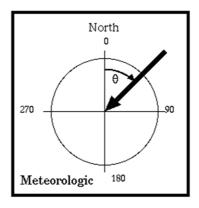


Figura 89 Convenzione metereologica per la determinazione della direzione delle onde

Il software WWL Data produce in output un file con estensione "*.nc" che contiene tutti i dati visualizzati.

13.9 Analisi delle condizioni di moto ondoso offshore

Le onde vengono filtrate, per tenere conto del solo settore di traversia di interesse per il paraggio in esame e per eliminare le altezze d'onda e i periodi d'onda trascurabili o affetti da evidenti anomalie di acquisizione. Questa operazione è utile anche per rendere più snello il lavoro computazionale che deve svolgere il software. Le onde che vengono escluse con il filtraggio, a seconda delle esigenze dell'utente, possono essere eliminate dai dati o semplicemente contrassegnati con un flag, come è stato scelto nel caso oggetto di studio. Quando il software nell operazioni di calcolo incontra un'onda flaggata non effettua alcun calcolo e procede nell'analisi. L'operazione di filtraggio viene effettuata con il comando "Station → Waves → Wave Height/Period/Direction/Transport Range", in seguito al quale compaiono finestre di dialogo analoghe a quella in .

Si è scelto di filtrare le onde con altezza minore di 0.5 m, perché non influenti nella simulazione, e maggiore di 8.5 m, perché sarebbero eventi anomali nell'area e probabilmente frutto di un'anomalia strumentale. Il filtraggio, per motivi analoghi, ha previsto l'esclusione dall'analisi di onde con periodo minore di 3 e maggiore di 12 secondi. La filtrazione delle onde in base alla direzione avviene grazie all'individuazione delle principali traversie delle onde (in rosso in Figura 90). Esse vengono tracciate considerando i limiti morfologici presenti ai bordi del dominio spaziale considerato. Nel caso preso in esame a Nord il limite morfologico considerato è il complesso di isole Palmaria e Tino (SP), che non fa passare onde provenienti da direzioni con angolazione superiori a 285°; a sud, invece, il limite morfologico sono le secche della Meloria (LI) e l'Isola d'Elba (LI) che limitano l'area di *fetch*, e quindi lo sviluppo, delle onde provenienti da angolazioni inferiori a 185°.

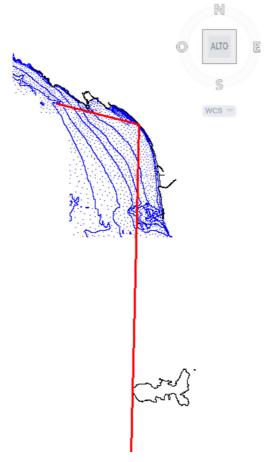


Figura 90 Traversie delle onde

Il software fornisce inoltre la possibilità di filtrare le onde anche secondo una direzione di trasporto solido prevalente, a seconda dell'inclinazione della linea di costa. Nel caso in esame si è scelto di non applicare questo filtraggio a causa dell'inclinazione non omogenea della linea di costa considerata. Dopo che il software ha elaborato il filtraggio si può salvare il file ottenuto con estensione "*.nc".

Il file ottenuto costituisce l'input per un altro software del pacchetto CEDAS: il WSAV, che consente di creare la matrice di frequenza delle "permutazioni" dei moti ondosi da utilizzare per le simulazioni numeriche. Le onde vengono quindi raggruppate per classi di periodo, altezza e direzione. In questo modo non si propaga tutta la serie temporale del moto ondoso, ma solo delle onde caratteristiche tenendo conto successivamente la frequenza di accadimento di quei particolari moti ondosi. Nel caso in esame le onde sono state divise per le altezze d'onda in 18 classi, che andavano da 0.5 m a 8.5 m con passo 1 m. Sono state stabilite 10 classi di periodo che si estendevano da 3 a 12 secondi con ampiezza di 1 secondo. Infine sono state determinate 11 classi per la direzione delle onde, che andavano da 180° a 290° con passo di 10°. Attraverso la suddivisione del moto ondoso in classi viene costruito un insieme di finestre che contengono le diverse combinazioni dei valori di periodo altezza e direzione, ciascuna con una determinata frequenza di accadimento. L'insieme di tutte le finestre

Wave Period (sec)

rappresentano il moto ondoso analizzato. Ad ogni finestra viene attribuito un valore di ciascun parametro. Il software permette di scegliere tra due possibilità: selezionando MIDPOINT il valore rappresentativo per la finestra è la media aritmetica tra gli estremi, selezionando MEAN tale valore è rappresentato dalla media pesata dei valori presenti nella classe. Nel caso in esame è stata utilizzata la funzione MIDPOINT. Una volta stabiliti questi parametri il software effettua l'analisi vera e propria e si ottiene in output il *permutation file* con estensione "*.nc". I dati di moto ondoso totali presenti erano 44397, riferiti al periodo temporale dal 1 luglio 1989 al 25 aprile 2005. Le permutazioni totali ottenute da tali dati sono.

In questa fase è importante ricordarsi di salvare, oltre al file di output, anche il file dove sono riportate le specifiche dell'analisi, in modo tale da poter correggere successivamente e considerare gli eventuali errori commessi.

A questo punto è possibile visualizzare i dati analizzati in diverse modalità grafiche: diagramma a blocco, istogramma o rosa delle onde. Nel diagramma a blocco è possibile visualizzare la distribuzione con diverse combinazioni: frequenza vs angolo d'incidenza vs periodo, frequenza vs angolo d'incidenza vs periodo oppure frequenza vs altezza d'onda vs periodo (Figura 91). L'istogramma riporta per ciascun parametro la frequenza per ogni classe (Figura 92). La rosa delle onde, invece, riporta le frequenze dei periodi o delle altezze d'onda per gli angoli di provenienza (Figura 93).

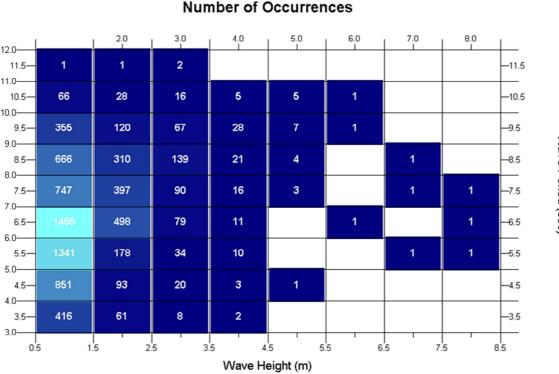


Figura 91 Diagramma a blocco della frequenza vs altezza d'onda vs periodo nell'interfaccia di WSAV in Nemos

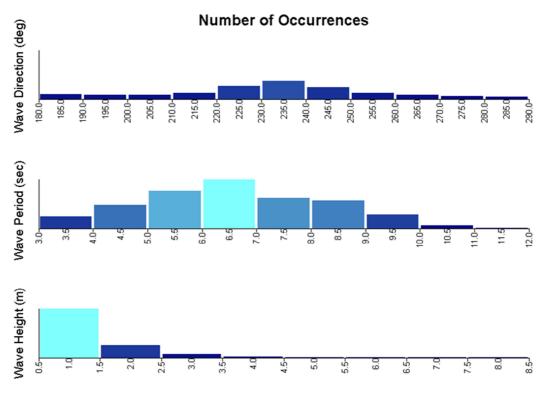


Figura 92 Istogramma delle frequenze di altezza d'onda, angolo di provenienza e periodo per ogni classe

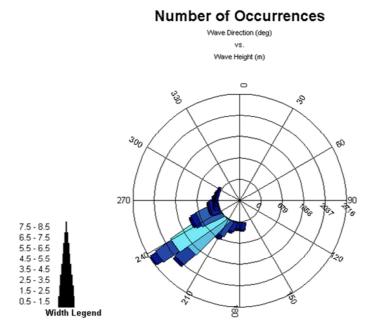


Figura 93 Rosa delle onde in cui è riportata la frequenza delle altezze d'onda per ogni direzione di provenienza

13.10 Creazione dello spettro

Nella fase successiva si crea lo spettro direzionale di tutte le permutazioni attraverso il software SPECGEN. L'input necessario è il *permutation file* creato nella fase precedente. È necessario inoltre importare i parametri di discretizzazione dello spettro, adeguati alla sua rappresentazione: il numero di classi, la frequenza minima ed il delta. Nel caso in esame il

numero delle classi è stato impostato pari a 25, la frequenza minima pari a 0.01 ed il delta pari a 0.02 e in questo modo il range di frequenza rappresentato va da 0.01Hz a 0.51Hz. Inoltre è stata impostata la condizione di conservazione dell'energia. L'azimuth è quello impostato per STWAVE, quindi 50°.

Il software crea uno spettro direzionale per ciascun evento.

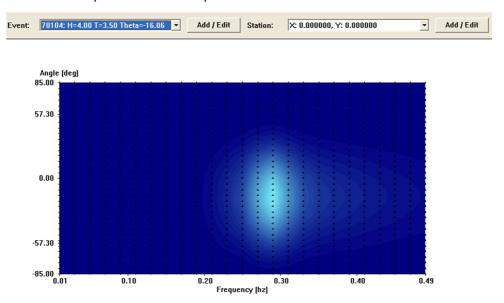


Figura 94 Spettro della frequenza dell'evento caratterizzato da altezza di 4m, periodo di 3.5 secondi ed angolo di – 16.06 rispetto all'asse

Lo spettro viene salvato come file con estensione "*.sgn".

13.11 Propagazione del moto ondoso da largo a costa

In questa fase si studia la trasformazione dei parametri fondamentali delle onde mentre si propagano verso costa. Bisogna innanzitutto configurare la simulazione in un'interfaccia iniziale del programma riportata in Figura 95. In essa si deve specificare nella casella in alto il titolo della simulazione, sotto se sono presenti o meno i dati da vento "Wind Specifications", se il livello dell'acqua deve essere considerato costante o variabile "Water Level Specifications", se l'area è interessata dalle correnti di marea "Current Specifications"e se vi sono griglie nested o parent "Grid Tipe". Nel caso in esame non compaiono dati da vento, il livello dell'acqua è costante e non vi sono né correnti di marea, né griglie nested o parent.



Figura 95 Interfaccia di STWAVE (Nemos) per impostare i dati per l'elaborazione della propagazione delle onde da largo a costa

Dopo la configurazione bisogna inserire ed indicare al software tutti i file di input e di output per la simulazione attraverso un secondo foglio della stessa interfaccia, riportato in Figura 96. I file di input che devono essere forniti sono il dominio spaziale, un file con estensione "*.nc" creato nella quarta fase, e lo spettro direzionale con estensione "*.sgn", creato nella fase precedente. I files di output sono: un field file con estensione "*.nc" ed un printout file con estensione "*.prt", i quali vengono creati ex novo con la simulazione. Vi è poi uno station file che è un file sia di input che di output, con estensione "*.nc".

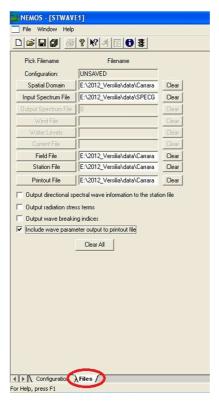


Figura 96 Interfaccia di STWAVE (Nemos) per impostare i files di input e di otuput per l'elaborazione della propagazione delle onde da largo a costa

Il software offre la possibilità di fornire altri file di input a seconda delle esigenze: il file con i dati del vento, uno relativo al livello dell'acqua ed un altro riguardante la corrente di marea, che non sono stati necessari per il caso in esame. A questo punto è necessario salvare le configurazioni che sono state applicate e lanciare la simulazione.

I risultati ottenuti dalla simulazione devono essere visualizzati attraverso l'utilizzo di un altro software: WMV (Wave Model Visualization), all'interno di Nemos. Questo software permette di visualizzare graficamente l'evoluzione dei parametri del moto ondoso, per i singoli eventi ondosi, nella loro propagazione da largo a costa. Il software deve ricevere in input il *field file* e lo *station file*. Per ogni evento è possibile visualizzare l'andamento dell'altezza d'onda, del periodo, della direzione, della velocità e della batimetria nello spazio (Figura 98 e Figura 97). Il software permette la visualizzazione di tali dati come contorni, isolinee, contorni ed isolinee insieme e superficie 3D. Inoltre è possibile visualizzare le posizioni delle stazioni nello spazio ed è possibile graficare i dati di ciascuna di esse.

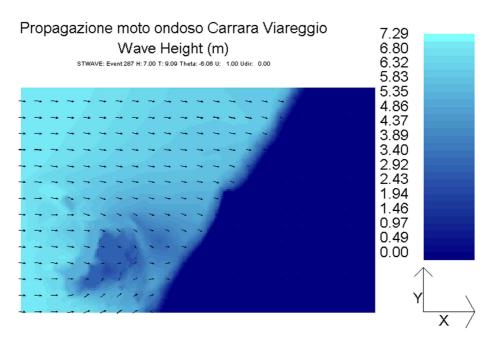


Figura 97 Particolare del fenomeno della rifrazione nelle Secche della Meloria (LI) nella visualizzazione della variazione dell'altezza d'onda e della direzione di propagazione (vettori in nero), durante la propagazione del moto ondoso da largo a costa per un evento ondoso di 7 m, con periodo 9.09 secondi e angolo di incidenza -6.06 (interfaccia di WMV di Nemos)

Propagazione moto ondoso Carrara Viareggio Wave Height (m)

STWAVE: Event 129 H: 2.00 T: 6.67 Theta: -43.43 U: 1.00 Udir: 0.00

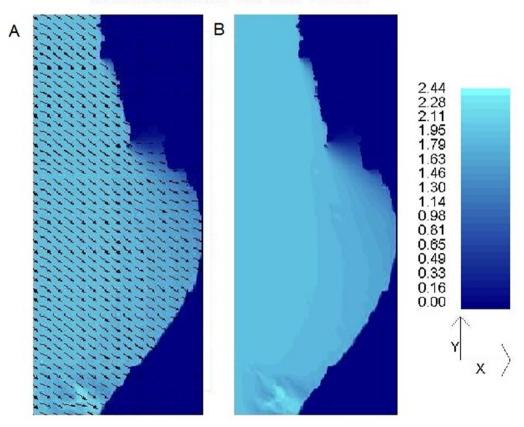


Figura 98 Visualizzazione della variazione dell'altezza d'onda e della direzione di propagazione (in A con i vettori neri) durante la propagazione del moto ondoso da largo a costa per un evento ondoso di 2 m, con periodo 6.67 secondi e angolo di incidenza -43.43 (interfaccia di WMV)

13.12 Simulazione della linea di riva

La fase finale prevede l'inserimento degli input che sono stati elaborati nelle fasi precedenti all'interno di GENESIS, per effettuare la simulazione dell'evoluzione della linea di riva.

Il primo input necessario è il dominio spaziale di GENESIS elaborato durante la quarta fase. Esso viene inserito con il comando "File→ Open Spatial Domain File". Il dominio si presenta come in Figura 99.

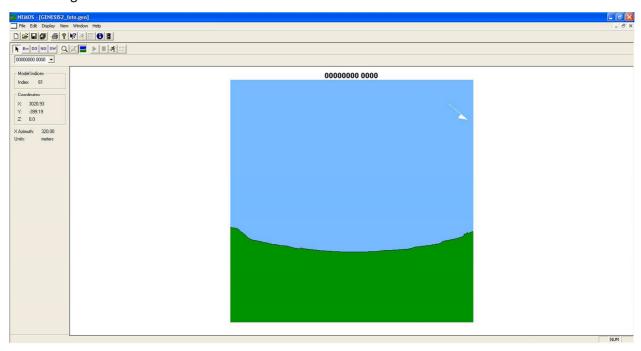


Figura 99 Visualizzazione del dominio spaziale di GENESIS (Nemos)

A questo punto bisogna configurare il modello inserendo i dati temporali relativi al moto ondoso, attraverso l'interfaccia in Figura 100 "Edit -> Configuration". Nella casella di testo in alto si deve inserire il titolo della simulazione. Sotto vi è il riquadro dove devono essere inseriti i dati temporali che riguardano la simulazione "Simulation Temporal Data". In particolare devono essere inseriti: la data di inizio e di fine delle registrazioni del moto ondoso inserite nel formato "aaaammgg", il time step che caratterizza tali dati, nel caso in esame 3 ore, ed il time step desiderato per la registrazione (che deve essere un multiplo di quello dei dati), fissato a 72 ore. Si inserisce quindi i file di input relativo al moto ondoso, ovvero il file WWL flaggato, nel campo "Wave Comp. 1". Nel caso di studio non è presente una seconda componente del moto ondoso, come accade per la maggior parte dei siti del Mar Mediterraneo. Inoltre si deve creare ex novo un file di visualizzazione per GENESIS "Visualization file". Inoltre si deve inserire il file delle stazioni "Station file".

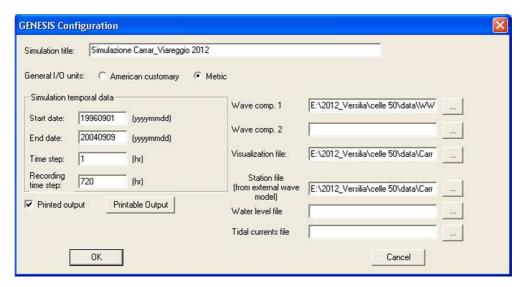


Figura 100 Finestra di dialogo di GENESIS per l'impostazione dei dati del modello

Il software dà la possibilità di visualizzare i dati relativi al sistema di coordinate scelto attraverso il comando "Edit→ Coord System Georeference".

Si possono inoltre inserire una linea di riva di partenza ed un'altra di riferimento, ad esempio quando deve essere fatta una calibrazione, attraverso la finestra di dialogo in Figura 101, a cui si accede con "Edit >> Shorelines >> Initial/Reference". Da questa finestra con il comando "File >> Importxy pairs" si possono importare le linee di riva come file "*.xy" o da diversi domini spaziali di GENESIS. È buona norma che le linee di riva importate su GENESIS abbiano i punti corrispondenti all'asse delle celle della griglia, in questo modo si hanno linee di riva da confrontare con un numero uguale di punti, necessario per caricarle sul programma.

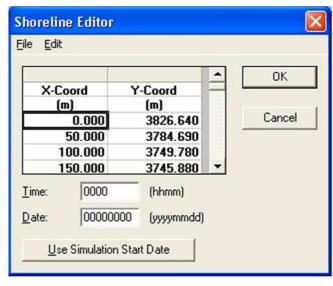


Figura 101 Finestra di dialogo di GENESIS per inserire le linee di riva iniziale e di riferimento

A questo punto si inseriscono le strutture ingegneristiche presenti nell'area d'interesse: pennelli che provocano diffrazione o meno, muri radenti e barriere parallele.

L'inserimento delle strutture deve tenere conto di alcuni aspetti:

- nel modello le strutture vengono rappresentate come linee, ovvero elementi estremamente fini;
- nel modello le estremità delle strutture vengono collocate ai wall delle celle;
- è necessario che vi siano sempre due celle tra un pennello e l'altro, sia che essi provochino diffrazione o meno;
- dietro le barriere possono essere collocati solo i pennelli che non provocano diffrazione;
- per formare una struttura a T si inseriscono nella stessa cella le estremità del pennello e delle due barriere, i valori delle coordinate e delle profondità di tali estremità devono coincidere;
- le strutture che provocano diffrazione non possono sovrapporsi, se non alle estremità;
- se ci sono più muri radenti nella stessa area, se ne inserisce uno unico con aree collocate a -9999 m di profondità dove il muro radente manca;
- i ripascimenti possono essere collocati ovunque e possono sovrapporsi nello spazio e nel tempo e possono coprire i pennelli. Nel modello i ripascimenti vengono inseriti al centro delle celle;
- qualsiasi barriera in contatto con la costa deve essere inserita come un pennello;
- vi sono dei limiti quantitativi stabiliti per le strutture: 70 pennelli, 20 muri radenti e 50 ripascimenti. Bisogna inoltre tenere presente che con il numero delle strutture cresce il tempo di esecuzione del modello.

Il comando attraverso il quale è possibile inserire le strutture è "Edit→ Structures→ Nondiffracting Groins and Jetties / Diffracting Groins and Jetties / Detached Breakwaters / Seawalls". Con "Diffracting Groins and Jetties" si possono inserire i pennelli che provocano diffrazione, attraverso la finestra di dialogo mostrata in Figura 102, in cui troviamo un tabella. In essa si deve inserire la coordinata in cui è inserita la parte iniziale del pennello "Start X1" e "Position Y1", le coordinate finali, "End X2" e "Position Y2", l'indice della cella della griglia in cui si trova l'opera "Model X Index", e la profondità a cui si trova la parte finale del pennello "Seaward Depth". Similmente si possono inserire anche le strutture che non provocano diffrazione.

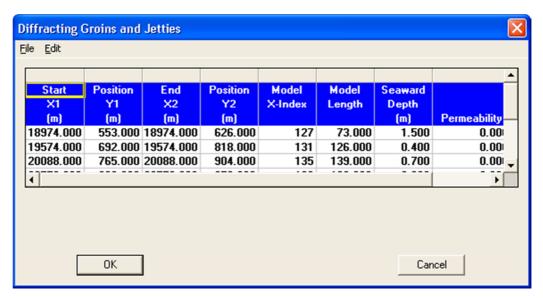


Figura 102 Finestra di dialogo di GENESIS per inserire i pennelli ed i moli che provocano diffrazione nel modello

Con il comando "Detached Breakwaters" si inseriscono le barriere parallele, attraverso la finestra di dialogo in , contenente anch'essa una tabella. In essa devono essere inserite le coordinate iniziale e finali "Start X1" "Position Y1", e "End X2" e "Position Y2" in cui è inserita la struttura, i rispettivi indici "Start Index" e "End Index" delle celle della griglia e le profondità a cui si trovano le estremità della struttura "Depth1" e "Depth2". Inoltre viene richiesto il coefficiente di trasmissione "Transmission Coefficient".

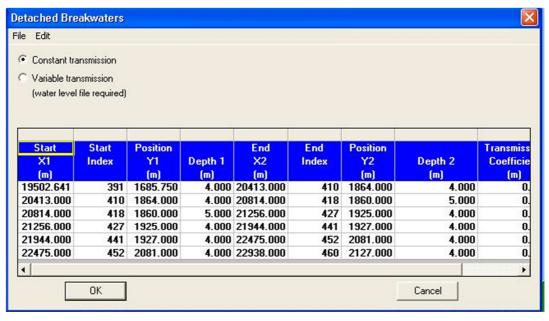


Figura 103 Finestra di dialogo di GENESIS per inserire le barriere parallele nel modello

Con il comando "Seawalls" si inseriscono nel modello i muri radenti, che sono utilizzati anche per rivestire quei tratti di costa che non subiscono variazioni perché costituiti da scogliere. Con questo comando compare una finestra di dialogo mostrata in Figura 104, nella quale devono essere inserite le coordinate del punto iniziale (Start X1 e Position Y1) e di quello finale del muro radente (End X2 e Position Y2)

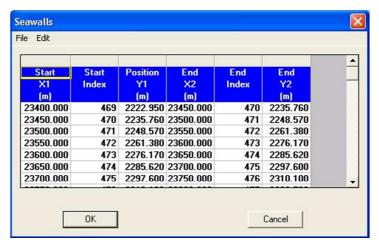


Figura 104 Finestra di dialogo di GENESIS per inserire li seawalls nel modello

Le coordinate che vengono inserite sono tutte riferite al sistema di riferimento di GENESIS, una volta che sono state inserite è possibile richiedere al software di stimare gli indici delle celle del modello di riferimento, senza inserirli manualmente, con il comando "Edit \rightarrow Exstimate X index from X coordinate".

Le strutture vengono rappresentate nel dominio spaziale con linee di diversi colori per le diverse tipologie.

Nel presente modello è stato necessario inserire innanzitutto le strutture per simulare i due porti. La struttura di un porto, come quello di Carrara riportato in Figura 105, solitamente prevede la presenza di un molo sottoflutto e di uno sopraflutto a cui si collega una diga foranea. Nella simulazione di tali strutture nel modello ciò che era fondamentale era simulare l'assenza di passaggio all'esterno di sedimento dal porto e la rifrazione provocata dal molo sottoflutto e dalla barriera. Questi aspetti sono stati simulati introducendo un *seawall* per tutta la lunghezza del porto. Al termine del *seawall* è stato inserito un pennello che provoca diffrazione alla cui sommità è stata inserita una piccola barriera, in modo che fossero coerenti con le dimensioni reali delle strutture. Questa configurazione è stata utilizzata sia per il Porto di Carrara che per il Porto di Viareggio. In GENESIS i due porti si visualizzano come mostrato in Figura 106.



Figura 105 Struttura di un porto, esempio del Porto di Carrara

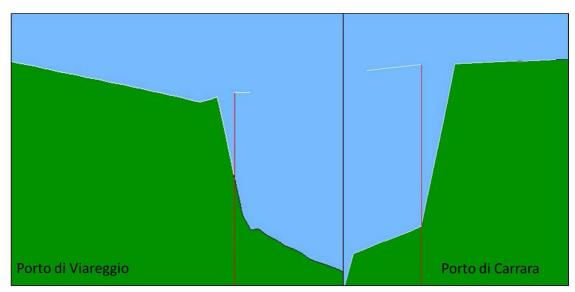


Figura 106 Visualizzazione dei Porti di Viareggio e di Carrara sul dominio spaziale di GENESIS. In rosso sono riportati i moli sottoflutto. In bianco sono rappresentati i *seawall* e le barriere

Le altre strutture presenti nell'area oggetto di studio sono quelle della zona che va dal Porto di Carrara a Marina di Ronchi. Nella zona che si estende immediatamente a S del porto di Carrara è stato inserito un *seawall*, per simulare le opere aderenti del primo tratto e l'alternanza di opere aderenti e parallele del tratto più meridionale (Figura 107). In Figura 108 è riportata la visualizzazione del *seawall* in GENESIS.



Figura 107 Zona che viene simulata come un seawall

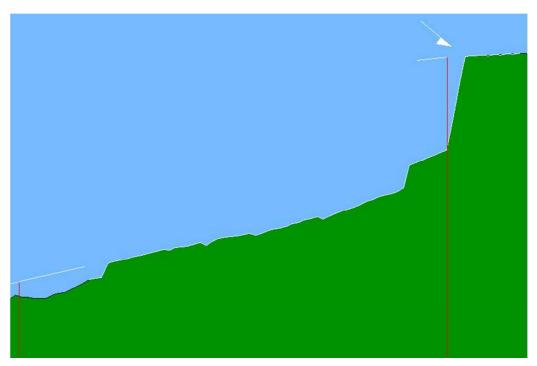


Figura 108 Visualizzazione del seawall a S del Porto di Carrara (in bianco) nel dominio spaziale di GENESIS

Nella parte più meridionale vi è una serie di pennelli che delimitano delle "vasche" chiuse alle estremità da delle barriere soffolte (Figura 109). Queste strutture sono state rappresentate da una serie di pennelli diffracting, collegati alle estremità da delle barriere a cui è stato applicato un coefficiente di trasmissione pari a 0.5, in accordo con lo studio di Mori, Cappietti e Aminti (2007). In Figura 108 è riportata la visualizzazione di tali strutture nel domnio spaziale di GENESIS.



Figura 109 Zona di Marina dei Ronchi che viene simulata con dei pennelli (in rosso) di fronte ai quali viene d disposta una barriera (in giallo)



Figura 110 Visualizzazione del sistema di pennelli (in rosso) e barriere (in bianco) a S del Porto di Carrara nel dominio spaziale di GENESIS

Il software richiede anche l'inserimento di informazioni riguardo ai sedimenti ed alle spiagge presenti nella costa, attraverso il comando "Edit→ Sand, Beach & Transport", con cui si attiva la finestra di dialogo in Figura 111. In "Sand and beach data" si inseriscono la granulometria media dei sedimenti "Effective grain size" in mm, l'altezza media della berma "Average berm height" in m e la profondità media di chiusura "Closure depth" in m. Inoltre si stabiliscono due parametri di calibrazione che regolano il trasporto solido "Longshore sand transport calibration coefficients",K1 e K2 che necessariamente devono essere rivisti alla luce della calibrazione e della verifica del modello.

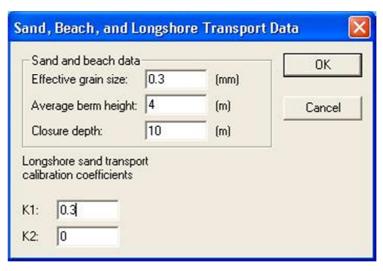


Figura 111 Finestra di dialogo di GENESIS (Nemos) per inserire i parametri sulla granulometria, la forma della spiaggia ed il trasporto solido *longshore*

Un'ulteriore fase di inserimento di informazioni all'interno del software è la determinazione del tipo di condizioni al contorno che ha l'area di interesse, che avviene con il comando "Edit→ Boundary Conditions" con cui si apre la finestra di dialogo in Figura 112, che ha due fogli, il primo per la definizione dei limiti in direzione *offshore*, il secondo per i limiti laterali. Nel primo foglio bisogna specificare se viene utilizzato o meno un modello esterno per la trasformazione delle onde "Wave Model Applied" ed il numero di componenti del moto ondoso presenti "Number of wave components to apply". Inoltre vengono richiesti i fattori di amplificazione dell'altezza e dell'angolo "Height amplification factor" e "Angle amplification factor" e l'angolo di offset . il software richiede inoltre informazioni riguardo la presenza o meno di un trend nei contorni regionali "regional contour" ed il numero di celle nella una finestra di smussamento dei contorni *offshore* "Number of cells in *offshore* contour smoothing window". Inoltre si deve inserire il rapporto esistente tra le celle della griglia di GENESIS e quelle utilizzate per il modello di trasformazione delle onde "Ratio of shoreline cells to wave model cells".

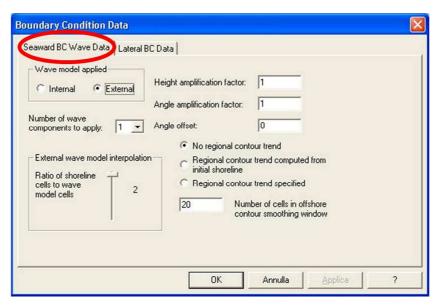


Figura 112 Finestra di dialogo di GENESIS per la determinazione delle condizioni al contorno, primo foglio, limiti in direzione offshore

Il secondo foglio della finestra, riportato in Figura 113, riguarda i limiti laterali del modello. Essi possono essere di diversi tipi: "gated (groin)", "gated (jetty), "pinned beach" o mobile "moving", a seconda delle caratteristiche di passaggio dei sedimenti e del movimento della linea di costa. Con un limite "pinned", quindi rappresentato da un tratto di costa che non si muove nel tempo non sono richieste ulteriori informazioni. Per un limite "gated" rappresentato da un lungo pennello o da un lungo molo vengono richiesti rispettivamente la lunghezza del pennello e la lunghezza ed orientazione del molo. Nel caso di un limite "moving" viene richiesta la velocità di movimento della linea di costa, che può essere espressa con diverse unità di tempo: per time step, per giorno o per l'intero periodo di simulazione.

Nel caso oggetto di studio i limiti del modello sono di pochi kilometri aldilà di entrambi i porti. Ai fini della simulazione si è scelto dei limiti di tipo pinned e i porti sono stati simulati attraverso l'introduzione di apposite strutture descritte in precedenza.

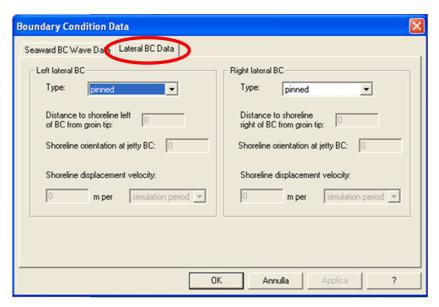


Figura 113 Finestra di dialogo di GENESIS per la determinazione delle condizioni al contorno, secondo foglio, limiti laterali

Dopo l'inserimento di tutti questi input è necessario salvare la configurazione, come un file con estensione "*.gen" e lanciare la simulazione.

13.12.1 Fase di calibrazione

Per calibrare i parametri del modello e per poter effettuare una simulazione futura attendibile è necessaria una fase di calibrazione. A tale scopo sono state ricostruite con i dati storici disponibili le linee di riva degli anni 1997 e 2005. Tali linee di costa nella zona che si estende dal Porto di Carrara a Marina di Ronchi sono state ricavate dai dati di GEOCOSTE del 2012, risultati idonei a tale scopo per entrambe le linee di riva in quanto la zona è completamente protetta da strutture dagli anni '80 e quindi non è soggetta a modifiche. La zona a S di Marina di Ronchi fino a circa 2 km a N di Lido di Camaiore (LU) è stata inserita nelle linee di riva con i dati forniti da Cipriani, et al. (2001), per la riva del 1997, mentre per la riva del 2005 sono stati forniti dalla Regione Toscana. Per la porzione più meridionale i dati per la riva del 2005 sono stati forniti dal database del Laboratorio di Costruzioni Marittime e Protezione dei Litorali (COAST LAB) del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze. La riva del 1997, per mancanza di dati in tale tratto, è stata approssimata ai dati ottenuti dalla scannerizzazione delle carte nautiche effettuata nella prima fase.

Le linee di riva pertanto risultano derivanti da dati notevolmente approssimati e tale calibrazione non ha quindi lo scopo di fornire dei valori indicativi, ma di dare delle indicazioni metodologiche sulla fase di calibrazione dei modelli in GENESIS.

In GENESIS è stato caricato il dominio spaziale stabilito per il modello e come linea di riva originale è stata impostata la linea di riva storica del 1997 e come linea di riferimento la linea di riva storica del 2005. Sono state effettuate diverse prove per stabilire con quali parametri,

per il moto ondoso inserito (dal 1997al 2005), dalla linea del 1997 si ottiene una linea di riva il più possibile simile a quella del 2005. I parametri che sono stati variati sono l'altezza media della berma, la granulometria media, compatibilmente dai range rilevati in letteratura (Cipriani, S., et al. 2001) e K_1 e K_2 . Una volta stabiliti i valori medi più rappresentativi della realtà della berma, 4 m, della profondità di chiusura, 10 m e della granulometria media, 0.3 mm, sono state effettuate diverse prove per stabilire i valori di K_1 . Da ciascuna di queste prove sono stati ricavati attraverso il comando "Display \rightarrow Shoreline Comparison Plots" i dati riguardanti le differenze misurate in m tra la linea di riva ottenuta e la linea di riva di riferimento per ciascuna cella. Da tale interfaccia possono essere plottate ed esportate tutte le linee di riva: riferimento ("meas"), originale ("original"), finale ("final"), minima ("min") e massima ("max").

Con il comando "Hardcopy \rightarrow Export data" si possono esportare i dati plottati su un file "*.txt". Sono state effettuate diverse simulazioni della linea di riva, con differenti valori di K_1 . Sono stati quindi ricavati i valori del *Root Mean Square Deviation*⁴ (RMSD) delle differenze tra le linee di riva ottenute e quella di riferimento. Successivamente sono stati plottati i valori ottenuti per individuare quale valore di calibrazione fosse quello che tendeva maggiormente ad annullare il *Root Mean Square Deviation* delle differenze (Figura 114).

Per sopperire alla scarsa qualità dei dati in input si è deciso di limitare i dati in base ai quali effettuare la calibrazione ai soli tratti dove erano presenti rilievi abbastanza dettagliati della linea di riva, ovvero dalla zona a S di Marina di Ronchi fino a circa 2 km a N di Lido di Camaiore. Il valore di K₁ corrispondente al punto di minimo del grafico, ovvero 0.1, può essere ritenuto quello che maggiormente simula in modo realistico le condizioni di evoluzione delle linea di riva oggetto si studio, vista la relazione lineare che è risultata. Tale considerazione deve sempre essere vista alla luce della scarsa qualità dei risultati in input e ciò che in questa parte dell'elaborato vuole essere sottolineato risulta essere l'aspetto metodologico. Sarebbe stato necessario effettuare anche un'ulteriore fase di verifica del parametro utilizzando altre linee di riva storiche, ma la mancanza di dati non ha permesso tale operazione.

⁴ RMSD = $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \sqrt{(x_a - x_i)^2}$

Dove:

x_a è il valore atteso;

x_i è il valore misurato;

N è il numero totale di valori.

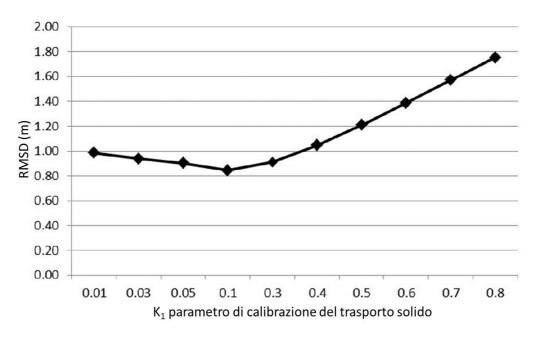


Figura 114 Root Mean Square Deviation delle differenze tra la linea di riva ottenuta e quella di riferimento per i diversi valori del parametro di calibrazione K₁

13.12.2 Fase di simulazione futura

Successivamente sono state effettuate delle simulazioni per le tendenze evolutive della linea di riva in 15 anni, utilizzando i dati di moto ondoso dal 1 luglio 1989 al 09 settembre 2004. Tali simulazioni hanno ovviamente diverse assunzioni basilari:

- i parametri riscontrati come attendibili durante la fase di calibrazione vengono ritenuti realistici e rappresentativi dell'area di interesse e delle sue caratteristiche sedimentologiche e morfologiche. Per mancanza di dati non è stato possibile effettuare una fase di verifica,
- si assume che il clima meteomarino descritto nel capitolo 8 rimanga tale negli anni futuri;
- il livello medio del mare, inteso come Still Water Level (SWL), si assume che non subisca variazioni considerevoli negli anni futuri; tale aspetto viene trattato nel capitolo 7.

Per tali simulazioni la linea di riva utilizzata come originale è quella del 2005.

13.13 Tips and tricks

Durante lo sviluppo del modello si sono verificati numerosi ostacoli di carattere pratico, di risoluzione non immediata. Si ritiene che sia utile riportare ciò nell'elaborato, con una struttura molto schematica, in modo tale che esso risulti utile ai futuri utilizzatori del software.

- È sempre necessario prestare la massima attenzione alla disposizione di virgole e punti nei file "*.txt" che si utilizzano per importare i dati nel software, tenendo presente che non sempre sono le medesime convenzioni che vengono utilizzate da AutoCAD.
- Controllare sempre la corretta impostazione delle unità di misura per tutti i software che si utilizzano.
- Vi è un valore massimo di punti della linea di riva che possono essere importati su Gri Generator, pari a 2700.
- Il valore degli angoli di azimuth deve essere un numero intero, altrimenti il software non trova corrispondenza tra i diversi domini spaziali.
- Quando si impostano le posizioni delle barriere su GENESIS, è fondamentale elencarle partendo da quelle più prossime all'origine e via via quelle più lontane (con coordinate crescenti). Inoltre è necessario stimare con la calcolatrice gli indici delle estremità delle barriere, perché il software per tale finestra di dialogo fornisce dei valori inesatti. Non chiudere la finestra di dialogo prima di aver impostato gli indici delle celle.
- Inserire le opere in GENESIS una ad una in modo tale da individuare più efficacemente i possibili errori.
- Quando si deve salvare un file non attraverso una finestra di impostazioni, ma semplicemente con il comando "File → Salva" è necessario chiudere la finestra del programma e confermare il salvataggio per renderlo definitivo, fatta eccezione per le configurazioni di GENESIS.

14Risultati e discussioni

La scarsa qualità dei dati utilizzati per tracciare le linee di riva storiche non hanno permesso di poter estrarre dai risultati del modello dei dati utili per considerare l'evoluzione delle singole spiagge della sub – unità fisiografica. Quindi non è stato possibile effettuare un'analisi a piccola scala spaziale. Tuttavia possono essere fatte delle considerazioni a livello macroscopico sulla linea di riva ottenuta dalla simulazione protratta per 15 anni riproducendo il moto ondoso registrato dal 1 luglio 1989 al 9 settembre 2004. La costa tra il Porto di Carrara e Marina di Ronchi non presenta nessuna tendenza evolutiva marcata, a causa della presenza di un'ingente estensione di strutture di protezione che ammontano a 9.3 km di scogliere su 6.7 km di costa (rapporto di protezione 1.4) (Aminti, Cammelli, et al. 2004). La zona a S di Marina dei Ronchi è caratterizzata da una tendenza erosiva che si estende circa per 2.050 km verso S (Figura 115). La Figura 116 mostra la differenze tra la linea di riva simulata dopo 15 anni e quella originale del 2005 per la zona di Marina dei Ronchi. Si noti che nella zona dei pennelli e delle barriere sommerse non vi è una sostanziale differenza, visto che la costa risulta efficacemente protetta. A S del sistema di barriere e pennelli si osserva una differenza negativa tra le due linee, corrispondente ad un'erosione. Tale differenza si estende per 2050 m ed ha un'entità di 20 -30 m, il picco del grafico è probabilmente dovuto ad una "spigolosità" della linea di riva. La tendenza erosiva di questa zona è dovuta alla presenza nella parte sopraflutto delle strutture citate. Queste strutture hanno risolto il problema dell'erosione localmente, ma hanno provocato uno spostamento di tale tendenza erosiva verso S, come è già stato sottolineato in studi precedenti, come quello di Cipriani, et al. (2001).

La zona da Marina dei Ronchi fino a 2 km a N dal Porto di Viareggio, ovvero la "Versilia Storica" non subisce significative evoluzioni della linea di riva, come era già stato evidenziato in studi relativi alle tendenze passate (Pranzini 2004).



Figura 115 Particolare della linea di riva simulata (in verde) e della linea di riva originale (in nero) nella zona di Marina dei Ronchi

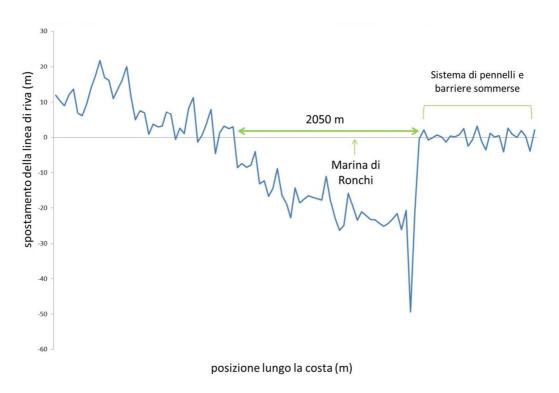


Figura 116 Grafico della differenze tra la linea di riva simulata e la linea di riva del 2005. È indicata la posizione di Marina di Ronchi e del sistema di barriere sommerse e pennelli

L'osservazione del grafico del trasporto solido netto medio nei 15 anni di simulazione, calcolato per ogni cella (Figura 117), conferma l'esistenza dei due *drift* prevalenti che caratterizzano l'unità fisiografica in cui è inserita la zona oggetto di studio (Cipriani, S., et al. 2001). Nella Figura 117 i valori positivi che si riscontrano sino a N di Marina di Pietrasanta, indicano la presenza di un *drift* diretto verso N, mentre i valori negativi, che compaiono nella parte più settentrionale, indicano la presenza di un *drift* verso S. il punto di incontro, come è già stato detto, non è statico, ma è il risultato di convergenze diverse in funzione dei diversi stati del mare (Pranzini 2004). L'incontro tra i due *drift* è caratterizzato dall'azzeramento del trasporto solido netto, che secondo il grafico ottenuto dalla simulazione ha una posizione media nei 15 anni corrispondente alla zona di Marina di Pietrasanta. Questo dato conferma i risultati dello studio di Pranzini (2004).

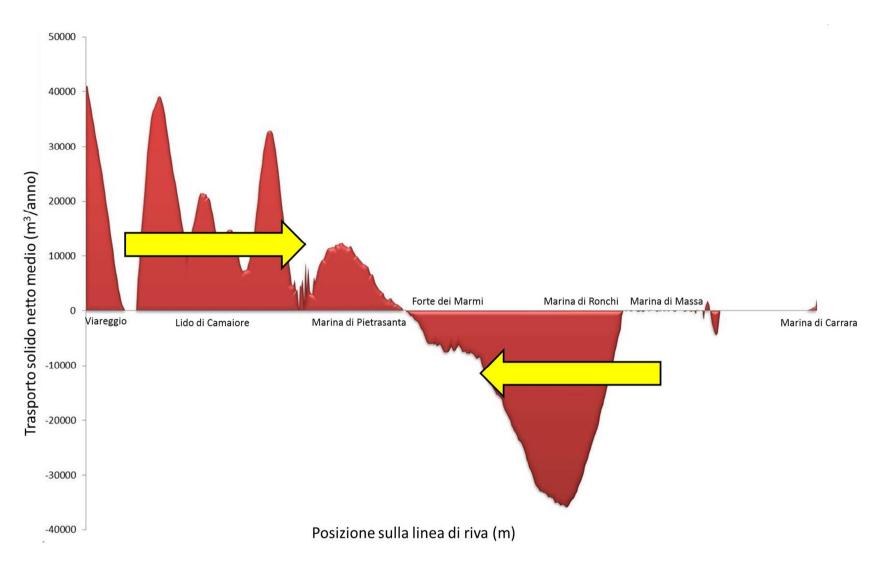


Figura 117 Grafico del valore medio del trasporto solido netto in 15 anni nell'area oggetto di studio. Le frecce gialle indicano la direzione dei drift indicata dai valori nel grafico

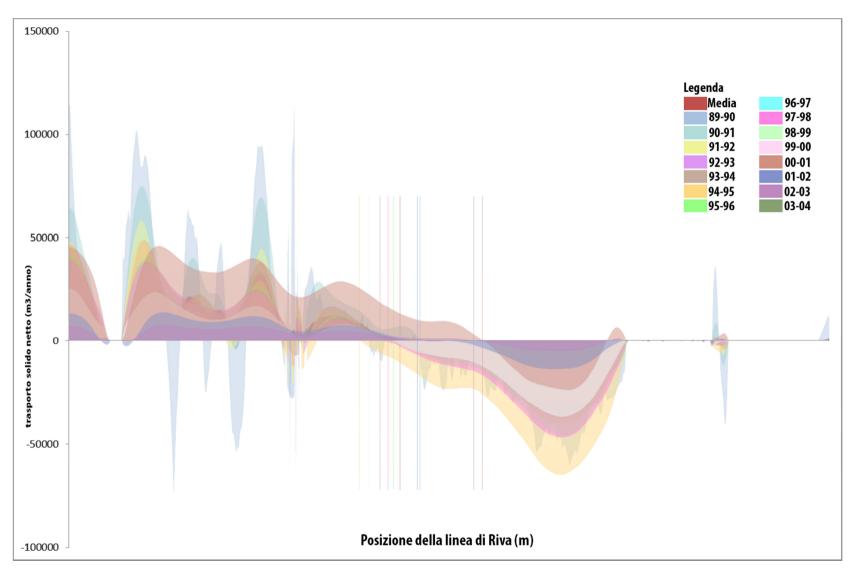


Figura 118 Grafico di confronto tra i trasporti solidi netti per ogni anno dell'intervallo temporale. Le linee verticali indicano la posizione del punto di incontro dei due drift

Grazie ai dati annuali del trasporto solido è stato creato il grafico in Figura 118, dove vengono confrontate le diverse posizioni del punto di incontro dei *drift* per ogni anno. Da tale grafico in Figura 118 emerge che i dati riguardanti dal 1989 al 1990 sono fuori dal trend evidenziato dai dati delle annate successive. Questo potrebbe essere dovuto a delle anomalie dei primi anni di installazione della boa ondametrica, oppure alla presenza di discontinuità dei rilievi della linea di riva, che negli anni successivi vengono "smussate" dalla simulazione. In tal modo dopo una fase inziale di simulazione falsata da questo aspetto gli anni successivi mostrano il trend reale fornito dalla simulazione. Pertanto nella fase successiva i dati relativi al range temporale 1989 – 91 sono stati trascurati, viste le tempistiche di tesi. Successivamente sarà necessario rivedere tali dati.

Si osservi la variazione, misurata in m, della posizione del punto di convergenza dei *drift* negli anni rispetto al suo valore medio in 15 anni, in Figura 119.

Il range di variazione della posizione della linea di riva è di circa 4500 m. Il punto di convergenza posto più a N è quello del periodo del 2000 -2001, quello posto più a S è quello del 1994 – 1995. Il range di variazione sulla costa è riportato in Figura 120

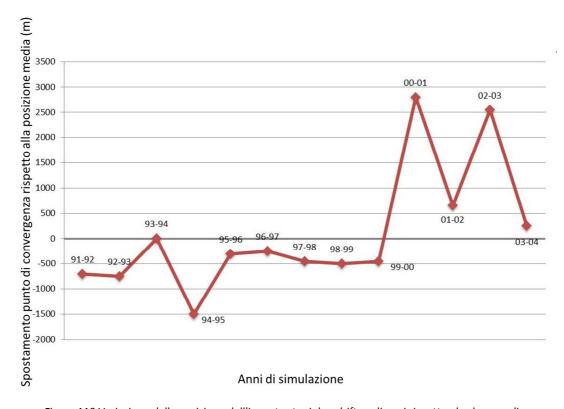


Figura 119 Variazione della posizione dell'incontro tra i due drift negli anni rispetto al valore medio

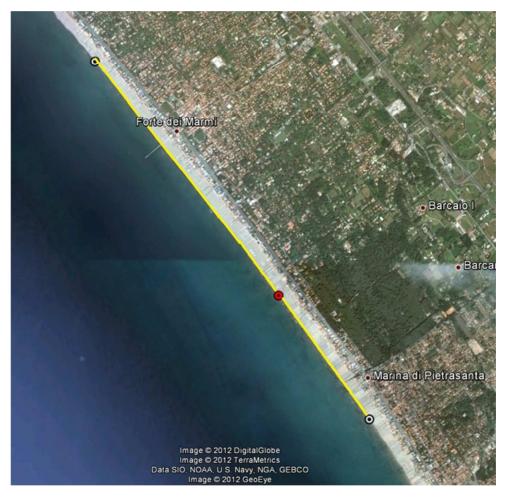


Figura 120 Visualizzazione del range di variazione spaziale della posizione della convergenza dei *drift* (in giallo), del suo valore medio (punto rosso) e dei suoi valori estremi (in bianco)

15Conclusioni

Il presente elaborato illustra una metodologia per l'implementazione di un modello dell'evoluzione della linea di riva con il software GENESIS, attraverso le sue diverse fasi: creazione del supporto cartografico digitale, determinazione del dominio spaziale di interesse, creazione della batimetria su Grid Generator, creazione della griglia di calcolo su Grid Generator, creazione della griglia di calcolo per GENESIS, creazione delle condizioni di moto ondoso offshore con WWL DATA, analisi delle condizioni di moto ondoso offshore con WWL DATA e WSAV, propagazione del moto ondoso da largo a costa con STWAVE, creazione dello spettro con SPECGEN, visualizzazione dei dati di moto ondoso propagati a costa con WMV, configurazione di GENESIS, impostazione delle condizioni al contorno e delle linee di riva storiche su GENESIS, simulazione della linea di riva su GENESIS e visualizzazione dei risultati della simulazione.

Le tendenze evolutive della linea di riva che sono state ricavate dalle simulazioni riguardanti un range temporale di 15 anni, basate sul clima ondoso dal 1989 al 2005, possono essere considerate indicative solo ad una media - grande scala spaziale, vista la scarsa qualità, disponibilità e completezza dei dati con cui sono che sono state create le linee di riva storiche. Tuttavia è possibile osservare la tendenza erosiva che caratterizza la zona di Marina di Ronchi, che si estende per circa 2050 m verso S, rispetto alle strutture di protezione presenti. Tale erosione, che ha un'entità stimata di circa 20 – 30 m in 15 anni, si è verificata successivamente alla costruzione delle opere di difesa della zona settentrionale. Queste opere sono state installate in seguito alla necessità di proteggere gli interessi antropici, tra cui la strada litoranea e le strutture turistiche, dall'erosione causata dai cambiamenti nel regime sedimentario del fiume Magra e dalla costruzione del Porto di Carrara. La costruzione è avvenuta in un periodo in cui il settore ingegneristico della protezione dei litorali non aveva i mezzi conoscitivi attuali e non vi era la consapevolezza della necessità di una gestione integrata dell'unità fisiografica, questo ha portato alla progettazione e realizzazione di strutture inadeguate, come è stato sottolineato anche da Cappietti e Aminti (2001). La costruzione di queste opere ha infatti risolto solo a livello locale il problema "spostandolo" nelle zone più meridionali, dove tutt'ora si cerca una soluzione che sia meno impattante a livello visivo e della qualità delle acque a riva. Tale soluzione dovrà essere coerente con una gestione integrata della sub – unità fisiografica, in modo da non avere ripercussioni sulle zone adiacenti, ovvero la "Versilia Storica", che sono a forte vocazione turistica.

Le simulazioni hanno permesso di studiare i dati sull'andamento del trasporto solido litoraneo nell'area oggetto di studio. L'analisi di tali dati ha nuovamente confermato l'esistenza di due drift prevalenti: uno diretto verso N, dalla parte meridionale dell'area ed uno diretto verso S dalla parte settentrionale. Il trasporto solido litoraneo netto medio dei 15 anni ha mostrato che la posizione di incontro tra i due drift si trova all'altezza di Marina di Pietrasanta, in accordo con gli studi precedenti, come quello di Pranzini (2004). Il punto di convergenza corrisponde al punto di annullamento del trasporto solido netto, esso non ha una posizione statica, ma è frutto di un equilibrio, il cui andamento dipende fortemente dalle condizioni di moto ondoso. Tale affermazione è confermata dall'analisi dello spostamento annuale del punto di convergenza che è stata effettuata dai dati delle simulazioni. Lo spostamento di tale punto nei 15 anni di simulazione ha avuto un range di circa 4.5 km.

Come è già stato sottolineato, il modello che è stato sviluppato in tale elaborato, alla luce dei dati attualmente disponibili, non può essere utilizzato in modo efficace per valutare gli effetti locali dell'installazione di opere di protezione. Tuttavia è possibile ad esempio confrontare tra loro gli effetti di due diverse installazioni, per valutare quale sia più efficace nell'ottica di una gestione integrata della sub – unità fisiografica. Una valutazione della singola opera a livello locale potrebbe essere effettuata con il presente modello, nel caso in cui si riuscissero a reperire dei dati precisi e più numerosi delle linee di riva storiche. In tal modo, seguendo la metodologia descritta, si potrebbero attuare una fase di calibrazione ed una di verifica dei parametri, per poter simulare la linea di riva ed ottenere dei dati validi anche a piccola scala spaziale.

16Bibliografia

- Aiello, E., et al. «Il Trasporto Litoraneo lungo la Costa Toscana tra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina.» *Bollettino della Società Geologica Italiana* 94 (1976): 1591 - 1571.
- Alley, R. B., P. U. Clark, P. Huybrechts, e I Joughin. «Sea Sheet and Sea Level Changes.» Science 310 (2005): 456 - 460.
- Aminti, P, L., F. Pelliccia, e E. Pranzini. «Evoluzione del profilo di spiaggia a seguito di un ripascimento artificiale in ghiaia su di una spaiggia altamente protetta.» *Note e Pubblicazioni di Ingegneria Idraulica, Università di Firenze* 30 (1983): 22.
- Aminti, P. L., C. Cammelli, L. Cappietti, N. L. Jackson, K. F. Nordstrom, e E. Pranzini. «Evaluation of beach response to submerged groin constrction at Marina di Ronchi, Italy, using field data and numerical simulation model.» *Journal of Coastal Research*, 2004: 99 120.
- Aminti, P. L., L. Cappietti, C. D'Eliso, e E. Mori. «Numerical simulation of an experimental sub,erged groin system.» *Coastal System*, 2007.
- Aminti, P. L., P. Iannotta, e E. Pranzini. «Morfodinamica di un Sistema Costiero estremamente protetto: il Litorale di Marina di Massa.» *Atti dei Convegni dei Lincei* 154 (1998): 263 270.
- Antonov, J., S. Levitus, e T.P. Boyer. «Thermosteric Sea Level Rise.» *Geophysical Research Letters*, 2005.
- Bakker, W. T. «The dynamics of a coast with a groyne system.» *Proceedings of the 11th coastal engineering conference* (American Society of Civil Engineers), 1968: 492-517.
- Bing, L. «A mathematical model for weakly nonlinear water wave propagation.» *Wave -motion*, 2010: 265 278.
- Briganti, R., et al. «Inventario delle opere di protezione costiera semisommerse, parallele a costa, presenti in Italia.» 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. 2002. 235–242.
- Bruun, P. Coast Erosion and the Development of Beach Profiles, Technical Memorandum No. 44,

 Beach Erosion Board. Vicksburg, MS.: US Army Corps of Engineers, Waterways

 Experiment Station, 1954.
- Burcharth, H. F., e S. A. Hughes. *Coastal Engineering Manual.* Vicksburg, MS, USA: U.S. Army Corps of Engineers, 2006.

- Cappietti, L. *Appunti dalle lezioni di Protezione dei Litorali* . A cura di A.A.2011 2012 Bonomi,
 Bravini, Garzella, Giuliani, Sammartino studenti del cdlm in Scienze Ambientali.
 Università di Pisa, A.A.2011-2012.
- Cappietti, L., e P. L. Aminti. «Interventi di riequilibrio di un tratto di costa difeso con opere a scogliera.» *Giornate Italiane di Ingegneria Costiera VI edizione*, 2001.
- Cavazza, S. «Regionalizzazione Geomorfologica del Trasporto Solido in sospensione dei corsi d'acqua tra il Magra e l'Ombrone.» *Atti Società Toscana Scienze Naturali*, 1984: 119 132.
- Cazenave, A., A. Lombard, e W. Llovel. «Present Day Sea Level Rise: A Synthesis.» *Comptes Rendus Geoscience*, 2008: 761 770.
- Cazenave, A., e W. Llovel. «Contemporary sea level rise.» *Annual Review of Marine Science* 2 (2010): 145 173.
- CERC. Shore Protection Manual. Washington. D.C, USA: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, U.S. Government, 1984.
- Chiabrera, G., N. Corradi, e G. Fierro. «Le barre della spiaggia sottomarina del litorale toscano (classificazione morfogenetica su base aereofotografica e rilievi batimetrici.» *Atti dell'Accademia di Scienze e Lettere* 37 (1980): 3 -17.
- Church, J.A., e N.J. White. «Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century.» Surveys in Geophysics, 2011: 585 - 602.
- Cipriani, L. E., Ferri S., Iannotta, P. P., F. Paolieri, e E. Pranzini. «Morfologia e Dinamica dei Sedimenti del Litorale della Toscana Settentrionale.» *Studi Costieri Dinamica e Difesa dei Litorali Gestione Integrata della Fascia Costiera* 4 (2001): 119 156.
- Cipriani, L. E., Ferri S., Iannotta, P. P., F. Paolieri, e E. Pranzini. «Morfologia e Dinamica dei Sedimenti del Litorale della Toscana Settentrionale.» *Studi Costieri*, 2001: 119 156.
- Coastal landscape:forms and processes. s.d. http://clasfaculty.ucdenver.edu/callen/1202/Landscapes/KarCoast/Coastal/CoastalLan dscapes.htm (consultato il giorno 12 2012).
- Coastal Udel Edu. s.d. http://www.coastal.udel.edu/ngs/waves.html (consultato il giorno 12 2012).
- Cogley, J. C:. «Mass and energy balance of glaciers and ice sheets.» In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*,, di Anderson. J. Wiley & sons, 2005.
- Cognetti, G., M. Sarà, e G. Magazzù. *Biologia Marina*. Milano, Italy: Calderini- Edagricole-Edizioni Agricole de Il Sole 24 ORE Business Media S.r.l., 2008.
- Crank, J. The Mathematics of Diffusion. Oxford, England: Clarendon Press, 1975.

- Davis, C.H., Y. Li, J. R. McConnell, M. F. Frey, e E. Hanna. «Snowfall-Driven Growth in East Antarctica Ice Sheet Mitigates Recent Sea Level Rise.» *Science* 308 (2005): 1898 1907.
- Davis, J. E. «STWAVE Theory and Program Documentation, Coastal Modeling System User's Manual.» In *Instruction Report CERC 91 1, Supplement 1*. Vicksburg. MS: U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station , 1992.
- De Filippi, G. Analisi del Trasporto Sedimentario e Stima dell'Evoluzione del Litorale compreso tra Foce d'Arno ed il Gombo nella situazione attuale e nell'ipotesi di interventi di stabilizzazione. Rapporto inedito, Regione Toscana, 1998.
- Dean, R. G. «Equilibrium Beach Profiles: US Atlantic and Gulf Coasts.» *Ocean Engineering**Report No. 12 (Department of Civil Engineering, University of Delaware), 1977.
- Dipartimento di Ingegneria delle Acque e di Chimica. *Studi propedeutici per la predisposizione* del piano stralcio . Bari: Università del Salento, 2010.
- Dyurgerov, M., e M. F. Meier. *Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot.*Boulde, Colorado: Institute of Arctic and Alpine Research, 2005.
- ENEA, Calamita A. ROMAINFORMA. Elementi di regime e protezione dei litorali. Roma, s.d.
- Folk, R. L., e W. C. Ward. «Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters.» *Journal of Sedimentary Petrology* 27 (1957): 3 26.
- Gehrels, R. «Rising Sea Levels as an Indicator of Global Change.» s.d.
- Gehrels, W.R., et al. «Onset of Recent Rapid Sea Level Rise in the Western Atlantic Ocean.» Earth and Planetary Science Letters, 2005: 2083 - 2100.
- Gehrels, W.R., et al. «Rapid Sea-Level Rise in the North Atlantic Ocean since the First Half of the Nineteenth Century.» *Holocene* 16 (2006): 949 965.
- Goda, Y. *Random Seas and Design fo Maritime Structures.* Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010.
- Goda, Y., T. Takayama, e Y. Suzuki. «Diffraction Diagrams for Directional Random Waves.»

 **Proceeding of 16th Coastal Engineering Conference.* American Society of Civil Engineers, 1978. 628 650.
- Gravens, Mark. «CHL: A history of GENESIS update.» *CHL: Coastal and Hydraulics laboratory*. s.d. http://chl.erdc.usace.army.mil/chl.aspx?p=s&a=Articles;457&g=90 (consultato il giorno marzo 23, 2012).
- Gregory, J. M., J. A. Lowe, e S. F. B. Tett. «Simulated Global Mean Sea Level Changes over the Last Half Millennium.» *Journal of Climate* 19 (2006): 4576 4591.
- Grinsted, A., J.C. Moore, e S. Jevrejeva. «Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD.» *Climate Dynamics* 34 (2010): 461 472.

- Hallermeier, R. J. «A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate.» *Coastal Engineering*, 1981: 253 277.
- Hallermeier, R. J. «Sand Transport Limits in Coastal Structure Design.» *Proceedings of Coastal Structures '83* (American Society of Civi lEngineers), 1983: 703 716.
- Hanson, H. *GENESIS, a generalized shoreline change model for engineering use.* Report No. 1007, Lund, Sweden: Department of water resource engineering, University of Lund, 1987.
- Hanson, H., e N. C. Kraus. Seawall Boundary Condition in Numerical Models of Shoreline Evolution. Technical Report CERC-86-3, Vicksburg, MS: US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, 1986b.
- Hanson, H., e N. C. Kraus. «Seawall Constraint in the Shoreline Numerical Model.» *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 111, n. 6 (1985): 1079 1083.
- —. «Tehnical Report CERC 89-19.» GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline change. Washington DC: Topografy Response Modeling Work Unit 32530, dicembre 1989.
- Hasselmann, K., et al. «Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP).» *Deut. Hydrogr. Z.*, 1973: 1 95.
- Holthuijsen, L. H. *Waves in Oceanic and Coatal Waters*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- Horikawa, K., e M. Hattori. «The Nearshore Environment Research Center project.» *Proceedings Coastal Sediments* (American Society of Civil Engineers), 1987: 756-771.
- Hunt, J. F. «Direct Solution of the Wave Dispersion Equation.» *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 105, n. WW4 (1979): 457 459.
- I.I.M. *Tavole di Marea e delle Correnti di Marea. Mediterraneo Mar Rosoo.* Genova: Istituto Idrografico della Marina, 1999.
- ISPRA. *Idromare: struttura RON.* s.d. http://www.idromare.it/struttura_scheda.php?RON=6 (consultato il giorno novembre 2012).
- Johannessen, O. M., K. Khvorostovsky, M. W. Miles, e L. P. Bobylev. «Recent ice-sheet growth in the interior of Greenland.» *Science* 310 (2005): 1013 1016.
- Jones, P.D., e M.E. Mann. «Climate Over Past Millennia.» Reviews of Geophyscis 42 (2004).
- Jonsson, I. G. Wave Current Interactions. Vol. 9, part A, in *The Sea*, di B. LeMehaute e D. M. Hanes. New York: Ed. John Wiley and Sons Inc., 1990.
- Kamphuis, J. W. «Alongshore sediment transport rate.» *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering ASCE* 117 (1991): 624 641.

- Introduction to Coastal Engineering and Management. London, UK: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000.
- Kemp, A.C., B. Horton, J.P. Donnelly, M.E. Mann, M. Vermeer, e S. Rahmstorf. «Climate Related Sea Level Variations Over the Past Two Millennia.» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011: 11017 11022.
- Komar, P. D., e D. L. Inman. «Longshore Sand Transport on Beaches.» *Journal of Geophysical Research* 73, n. 30 (1970): 5914 5927.
- Krabill, W., et al. «Greenland ice sheet: Increased Coastal Thinning.» *Geophysical Research Letters*, 2004.
- Kraus, N. C. «Applications of a shoreline prediction model.» *Proceedings of Coastal Structures*'83 (American Society of Civil Engineers), 1983: 632-645.
- Kraus, N. C. «Beach change modeling and the coastal planning process.» *Proceedings coastal zone '89* (American Society of Civil Engineers), 1989: 553-567.
- Kraus, N. C. «Estimate of Breaking Wave Height Behind Structures.» *Journal of Waterway, Port,*Coastal and Ocean Engineering 110, n. 2 (1984): 276 282.
- Kraus, N. C. «One-Line Development and Simulation for Oarai Beach.» In NERC Report No. 13,

 Cooperative Research of Surf Zone Dynamics, Part 3, Beaches Near Breakwaters and

 Rocky Coasts, 155-192. Tokyo, Japan: Nearshore Environment Research Center, 1981.
- —. Part IV: Prediction model of shoreline change. A cura di University of Tokyo Press. Vol. Chapter 2: Wave Model, Chapter 3: Shoreline Change Model, Chapter 4: Numerical Calcolation Method. Tokyo, Japan: K. Horikawa Ed., 1988.
- —. «Pragmatic Calculation of the Breaking Wave Height and Wave Angle Behind Structures.»
 Proceedings of 29th Japanese Coastal Engineering Conference. Japan Society of Civil Engineers, 1982. 259 299.
- Kraus, N. C., e H. Hanson. «Discussion of: Beach Nourichment in Presence of Seawall, by Dean, R. G. and Yoo, C.-H.» *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 121 (5) (1995): 272 274.
- Kraus, N. C., e S. Harikai. «Numerical Model of the Shoreline Change at Oarai Beach.» *Coastal Engineering* 7, n. 1 (1983): 1 28.
- Kraus, N. C., H. Hanson, e M. Larson. «Threshold for Longshore Sand Transport and Application to a Shoreline Change Simulation Model.» *Proceedings on Mathematical Modelling of Sediment Transport in the Coastal Zone* (International Association of Hydraulic Research), 1988: 117 126.
- Kraus, N. C., M. Larson, e N. A. Wise. «Depth of closure in beach-fill design.» 1999.

- Kraus, N.C., M. Isobe, H. Igarashi, T. Sasaki, e K. Horikawa. «Field Experiments on Longshore Sand Transport in the Surf Zone.» *Proceedings of 18th Coastal Engineering Conference* (American Society of Civil Engineers), 1982: 969 988.
- Krumbein, W. C. «Size frequency distribution of sediments.» *Journal of Sedimentary Petrology* 4 (1934): 65 77.
- Lambeck, K., et al. «Paleoenvironmental Records, Geophysical Modelling and Reconstruction of Sea Level Trends and Variability on Centennial and Longer Time Scales.» In *Understanding Sea Level Rise and Variability*, di J.A. Church, P.L. Woodworth, T. Aarup e W.S. Wilson. London, UK: Wiley-Blackwell Publishing,, 2010.
- Lambeck, K., M. Anzidei, F. Antonioli, A. Benini, e A. Esposito. «Sea Level in Roman time in the Central Mediterranean and Implications for Recent Change.» *Earth and Planetary Science Letters* 224 (2004): 563 575.
- Leenknecht, D. A., e A. Z. Szuwalski. *Automated Coastal Engineering System*. Vicksburg, MS: US

 Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center,
 1990.
- Lemke, P. et al. «Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground.» In *Climate Change* 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, di S. Solomon, et al. Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- Levitus, S., J. Y. Antonov, e T. P. Boyer. «Warming of the World Ocean, 1955 2003.» Geophysical Research Letters, 2005.
- Longuet-Higgins, M.S. «Longshore Currents Generated By Obliguely Incident Sea Waves, Parts 1 and 2.» *Journal of Geophysical Research* 75 (1970): 6778 6801.
- Mancinelli, A., et al. «Opere di difesa realizzate con strutture sommerse ed a cresta bassa ad Alghero (SS), Perd'e Sali (CA), Marina di Massa (MS), Marina di Pisa (PI), Porto Recanati (MC), Marina di Montemarciano (AN), Lido di Dante (RA) e Pellestrina (VE).» *Studi Costieri* 9 (2005): 7 50.
- Mazzantini, R: Pasquinucci, M. «The evolution of the Luni Pisa coastline (II cent. B. C. second half of the XIX cent.).» *Commission on Coastal Environment*. Bologna, ITA: Bird E.C.F. e Fabbri P., 1983.
- Meehl, G.A., et al. « 2007: Global Climate Projections.» In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, di S. Solomon, et al. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

- Mei, C. C. *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves.* Singapore: World Scientific Publishing, 1989.
- Meier, M. F., et al. «Glaciers dominate Eustatic sea level rise in the 21st century.» *Science* 317 (2007): 1064 1067.
- Merrifield, M.A., S.T. Merrifield, e G.T. Mitchum. «An Anomalous Recent Acceleration of Global Sea Level Rise.» *Journal of Climate* 22 (2009): 5772 5781.
- Meyssignac, B., e A. Cazenave. «Sea Level: A Review of Present-Day and Recent-Past Changes and Variability.» *Journal of Geodynamics* 58 (2012): 96 109.
- Miche, M. «Le Pouvoir Reflechissant des Ouvrages maritimes Exposes a l'action de la Houle.» Annals des Ponts et Chaussess 121e Annee (1951): 285 - 319.
- Mimura, N., T. Shimizu, e K. Horikawa. «Laboratory Study on the Influence of Detached Breakwater on Coastal Change.» *Proceedings of Coastal Structures '83,* (American Society of Civil Engineers), 1983: 740 752.
- Mitchell, J. H. «On the Highest Waves in Water.» *Philosophic Magazine* Series 5, n. 36 (1893): 430 437.
- Mitchum, G.T., R.S. Nerem, M.A. Merrifield, e W.R., Gehrels. «Modern Sea Level Changes Estimates.» In *Understanding Sea Level Rise and Variability.*, di J.A. Church, P.L. Woodworth, T. Aarup e W.S. Wilson. London, UK: Wiley-Blackwell Publishing, 2010.
- Mitsuyasu, H., e S. Mizuno. «Directional spectra of ocean surface waves.» *Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering*. Honolulu, Hawaii, USA: ASCE, 1976.
- Moberg, A., D.M. Sonechkin, K. Holmgren, N.M. Datsenko, e W. Karlén. «Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data.» *Nature* 433 (2005): 613 617.
- Moore, B. Beach Profile Evolution in Response to Changes in Wate rLevel and Wave Height.

 Newark, DE: Thesis, Department of Civil Engineering, University of Delaware, 1982.
- Mori, E., L. Cappietti, e P. L. Aminti. «Numerical simulation of an experimental submerged groin system.» 2007.
- Morner, N. A. «Estimating Future Sea Level Changes from Past Records.» *Global and Planetary Change* 40 (2004): 49 54.
- Nerem, R.S., D.P. Chambers, C. Choe, e G.T. Mitchum. «Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions.» *Marine Geodesy* 33 (2010): 435 446.
- Ngo-Duc, T., K. Laval, Y. Polcher, A. Lombard, e A. Cazenave. «Effects of land water storage on the global mean sea level over the last half century.» *Geophysical Research Letters* 32 (2005).

- Noli, A., e L. Franco. «L'Evoluzione del Litorale Pisano:risultati di uno Studio con impiego di Modelli Matematici.» Comune di Pisa, 1989.
- Oceanography Lecture: Waves and Beaches. s.d. http://science.kennesaw.edu/~jdirnber/oceanography/LecuturesOceanogr/LecWaves/LecWaves.html (consultato il giorno 12 2012).
- Ozasa, H., e A. H. Brampton. «Mathematical Modeling of Beaches Backed by Seawalls.» Coastal Engineering 4, n. 1 (1980): 47 - 64.
- Pelnard, e Considere. «Essai de Theorie de l'Evolutio des Form de Rivage en Plage de Sable et de Galets.» 4th Journees de l'Hydralique, Les Energies de la Mer Question III, n. 1 (1956): 289-298.
- Perlin, M., e R. G. Dean. «Prediction of beach planforms with littoral controls.» *Proceedings of the 16th Coastal Engineering Conference* (American Society of Civil Engineers), 1978: 1818-1838.
- Petit, J. R., et al. «Climate and Atmospheric History of the Past 420.000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica.» *Nature* 399 (1999): 429 436.
- Pfeffer, W.T., J.T. Harper, e S. O'Neel. «Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise.» *Science* 321 (2008): 1340 - 1343.
- Pinet, P. R. Invitation to Oceanography. Sudbury, MA, USA: Jones and Bartlett Ed., 2009.
- Pranzini, E. «A model for cuspate river delta erosion .» 6th Symposium on Coastal and Ocean Management/ASCE, 1989: 4345 4357.
- Pranzini, E. «Bilancio sedimentario ed evoluzione storica delle spiagge.» *Il Quaternario*, 1994: 197 204.
- Pranzini, E. «Caratteristiche Morfologiche e Sedimentologiche di una zona di convergenza del trasporto litoraneo (Versilia, Toscana).» *Studi Costieri: Dinamica e difesa dei litorali Gestione integrata della fascia costiera* 8 (2004): 135 149.
- Pranzini, E. «Cause naturali ed antropiche nelle variazioni del bilancio sedimentario dei litorali.» *Memorie Geografiche*, 1995: 47 62.
- —. La Gestione delle aree costiere. Edizioni delle autonomie, 1985.
- Pranzini, E. «Updrift river mount migration on cuspate deltas: two examples from the cost of Tuscany (Italy) .» *Geomorphology*, 2001: 125 132.
- Rahmstorf, S.,. «A New View on Sea Level Rise.» Nature Climate Change 4 (2010): 44 45.
- Rahmstorf, S.,. «A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise.» *Science* 315 (2007): 368 370.

- Ramillien, G., S. Bouhours, A. Lombard, A. Cazenave, F. Flechtner, e R. Schmidt. «Land water contributions from GRACE to sea level rise over 2002–2006.» *Global and Planetary Change*, 2008: 381 392.
- Resio, D. T. «A Steady State Wave Model for Coastal Applications.» *Proceedings of 21st Engineering Conferation*, 1988b: 929 940.
- Resio, D. T. «Shallow Water Waves. II: Data Comparison.» *Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1988a: 50 65.
- Resio, D. T., e W. Perrie. «Implications of an f—4 Equilibrium Range for Wind-Generated Waves.» *Journal of Physical Oceanography* 19 (1989): 193 204.
- Resio, D.T. «Shallow Water Waves. I:Theory.» *Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1987: 929 940.
- Rignot, E., I. Velicogna, M.R. van den Broeke, A. Monaghan, e J. Lenaerts. «Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise.» *Geophysical Research Letters* 38 (2011).
- Rohling, E.J., K. Grant, M. Bolshaw, M. Sidall, Ch. Hemlebben, e M. Kucera. «Antarctic Temperature and Global Sea Level Closely Coupled over the Past Five Glacial Cycles.» *Nautral Geoscience* 2 (2009): 500 - 504.
- Roth, Günter D. Meteorologia. Milano, Italy: Arnoldo Mondadori editore S.p.A, 1978.
- Sanders, Jeffery P. *jefferypsanders.com:autolisp_IMPORTXYZ*. 04 gennaio 2012. http://www.jefferypsanders.com/autolisp_IMPORTXYZ.html (consultato il giorno aprile 2012).
- Seneviratne, S.I., Nicholls, N., et al. «2012: Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment.» In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).*, di C.B. Field, et al., 109 230. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press,, 2011.
- Servert, M. S. *Your geography and history world.* s.d. http://yourgeographyandhistoryworld.blogspot.it/p/3-eso.html (consultato il giorno 12 2012).
- Siddall, M., E. J. Rohling, A. Almogi-Labin, Ch., Meischner, D. Hemleben, I. Schmelzer, e D. A. Smeed. «Sea Level Fluctuations during the Last Glacial Cycle.» *Nature* 423 (2003): 853 858.
- Smith, E. R., e N. C Kraus. *Laboratory Study on Macro-Features of Wave Breaking Over Bars and Artificial Reefs Tech. Rep. CERC-90-12.* Vicksburg, MS.: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, 1990.

- Smith, J. M., A. R Sherlock, e D. T. Resio. *STWAVE: Steady State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE, Version 3.0.* Washington, DC: U. S. Army Engineer Research and Development Center, 2001.
- Smith, J. M., D. T. Resio, e A. K. Zundel. «STWAVE Steady State Spectral Wave Model; Report

 1: User's Manual for STWAVE Version 2.0.» In *Instructional Report CHL 99 1*.

 Vicksburg, MS: U. S. Army Engineer Research and Development Center, 1999.
- Smith, J. M., D. T. Resio, e C. L. Vincent. «Current Induced Breaking at an Idealized Inlet.» *Proceedings on Coastal Dynamics '97*, 1997: 993 - 1002.
- Stewart, R. H. *CNR:ISMAR Ancona: Ocenaografia e navigazione.* 30 luglio 2007. http://ancona.ismar.cnr.it/IPO/IPO-16/capitolo16.htm (consultato il giorno dicembre 3, 2012).
- Strahler, A. N. Geografia Fisica. New york, NY, USA: John Wiley and Sons Inc., 1984.
- Szuwalski, A., e A. Morang. *Coastal Engineering Manual*. Vicksburg, MS,USA: U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 1972.
- Thomas, R. H., et al. «Accelerated sea level rise from West Antarctica.» *Science* 306 (2004): 255 258.
- Ursell, R., R.G. Dean, e Y. Yu. «Force Small-Amplitude Water Waves: A Comparison of Theory and Experiment.» *Journal of Fluid Mechanics* 7, part 1 (1960): 33 52.
- US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center. *Shore Protection Manual.* IV. 2 vol. Washington, DC.: US Government Printing Office, 1984.
- Wikipedia. Wikipedia: Mar Mediterraneo. 17 Novembre 2012. http://it.wikipedia.org/wiki/Mar_Mediterraneo (consultato il giorno Novembre 26, 2012).
- Woods Hole Group. 7 giugno 2011. http://woodsholegroup.wordpress.com/2011/06/07/what-happens-to-a-nourished-beach-in-a-storm/ (consultato il giorno 12 2012).
- Woodworth, P.L., M. Menendez, e W.R. Gehrels. «Evidence for Century-Timescale Acceleration in Mean Sea Levels and for Recent Changes in Extrem Sea Levels.» *Surveys in Geophysics*, 2011: 603 618.
- www.idromare.it. n. d. http://www.idromare.it/struttura_scheda.php?RON=6 (consultato il giorno luglio 2012).
- Zwally, H. J., et al. «Mass Changes of the Greenland and Antarctica Ice Sheets and Shelves and Contributions to Sea Level Rise:1992 2002.» *Journal of Glaciology* 51 (2005): 509 524.

17Ringraziamenti

Alla fine di questo lungo percorso vorrei ringraziare tutti coloro che mi sono stati accanto, anche solo con un sorriso o con una chiacchierata, in particolare:

Ringrazio il Prof. Lorenzo Cappietti, per avermi guidata ed aiutata con i suoi preziosi insegnamenti durante il mio percorso di tesi con tanta passione, pazienza e disponibilità.

Ringrazio il Prof. Michele Marroni, per l'aiuto che mi ha fornito durante il lavoro di tesi, ma soprattutto per la passione e la vicinanza che ha dimostrato a me ed ai miei colleghi in questi anni di università.

Ringrazio la dott.ssa Ilaria Crema per avermi aiutata ad entrare nell'appassionante mondo della modellistica numerica, condividendo con me intoppi, difficoltà e piccoli successi con tanta pazienza.

Ringrazio l'Ing. Andrea Esposito, per il suo aiuto nei momenti di difficoltà in laboratorio, per il vicendevole sostegno che ci siamo forniti e per i pranzi insieme.

Ringrazio i miei genitori, Pino e Adelly, per essermi stati sempre accanto, per avermi aiutata nei momenti più difficili della mia vita, ma soprattutto per avermi insegnato a lottare sempre, in qualsiasi circostanza, accanto a chi ti vuole bene. Grazie perché credo che sia davvero l'insegnamento migliore che mi avreste potuto dare.

Ringrazio Dado, perché non ha mai lasciato la mia mano, dandomi sempre la forza di lottare, anche quando non ci credevo più. Grazie per avermi aiutata con tutto l'amore del mondo, per avermi sempre ascoltata, anche nei miei capricci, per essermi stato accanto nei momenti più difficili della mia vita, dicendomi che sarebbe andato tutto per il meglio, dimostrandoti sempre il grande uomo che sei. Grazie per essere entrato nella mia famiglia, diventandone un punto di riferimento. Grazie perché non serve mai spiegarti cosa penso e cosa provo, tu sai sempre cosa c'è nel mio cuore, anche prima di me. Grazie amore per avermi reso davvero la tua principessa, ti amo, sei l'uomo della mia vita.

Ringrazio la mia famiglia: la zia Dona, Francesco, la nonna Irma, la zia Marzia e lo zio Piero per avermi insegnato cosa significa essere una famiglia, per essere davvero stati una squadra formidabile nei momenti difficili, per avermi sempre coccolata, dimostrandomi un amore infinito, che mi ha reso forte.

Ringrazio Azzurra, la mia grande amica, che ha saputo sempre starmi accanto, che mi ha dato un rifugio in uno dei momenti più bui della mia vita, che mi ha sempre ascoltata, ritagliando i nostri piccoli momenti nella nostra vita di studentesse disperate. Grazie per essere riuscite a vivere insieme, come sognavamo alle elementari, ma soprattutto per non aver deluso questo sogno di bambine, rimanendo unite, aldilà di tutto.

Ringrazio Debora e Lorenzo, per non avermi mai fatto sentire la distanza materiale anche nel cuore, per essersi invece dimostrati sempre di più dei grandi amici. Grazie per essere riusciti sempre a trovare il tempo per le nostre chiacchierate, che mi hanno scaldato il cuore, dimostrandomi che le grandi amicizie non crollano di fronte a niente.

Ringrazio le mie bisiette, Laura e Lorena, per questo ultimo anno passato assieme, per avermi subito accettata, per l'amicizia che è nata e per aver condiviso con me le gioie e le difficoltà. Vi ringrazio per il clima gioioso a cena, per l'aiuto reciproco che non è mai mancato, per le risate che mi hanno regalato nei momenti più bui, per aver studiato in compagnia, rendendo tutto meno pesante. Vi ringrazio perché avete saputo starmi accanto, dimostrandovi delle bimbe straordinarie.

Ringrazio anche Gabriele e Sasha, per aver aiutato Dado in questa difficile impresa della frequentazione della Bisie's home, senza mai disperare, divertendoci insieme.

Ringrazio Federico, Giulia, Manu, Carlo, Mariangela, Dario, Tommaso e le due Laura per essersi dimostrate le persone straordinarie ed i grandi amici che sono. Grazie per essermi stati vicini nei momenti più difficili della mia vita, non lasciandomi mai sola e regalandomi sempre un sorriso. Grazie per le serate passate assieme, che tanto mi hanno aiutata a rilassarmi, a dimenticare almeno per un po' le difficoltà e a rendere migliori questi anni, grazie ragazzi, di cuore.

Ringrazio la famiglia Zaccagnini al completo, ma soprattutto, e non me ne abbiano gli altri, le nonne, per avermi sempre ospitata aiutata e... nutrita con tanto affetto.

Ringrazio i "vicini": Andrea, Daniele, Davide, Dario e Diego, per le divertenti serate passate assieme con pizze, tisane, cene varie e partite, per essere stati degli amici, per aver sopportato le pazzie di una casa di sole donne, o meglio, Bisie. Grazie ragazzi.

Ringrazio Mimma, per essere stata una grande amica, per avermi aiutata in uno dei momenti più difficili della mia vita. Per avermi aiutata a lottare, motivandomi e dandomi coraggio. Grazie per le belle cene organizzate insieme e per le lunghe chiacchierate che ci tenevano alzate anche se il giorno dopo c'era lezione.

Ringrazio Nico, per avermi sempre strappato un sorriso, anche quando non erano decisamente giornate "si". Grazie per aver condiviso con me le ansie della vita universitaria con tanta passione.

Ringrazio Gioietta, per i suoi preziosi consigli nei momenti difficili, per aver riso tanto insieme e per essersi dimostrata un'amica.

Ringrazio Albe, Ambra, Cappe, Vitto e lla per aver condiviso con me la vita da universitari, per esserci aiutati nelle difficoltà, per aver lavorato fianco a fianco, ma anche per esserci divertiti tanto insieme, siete impagabili ragazzi, grazie