

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

DICAM

TESI DI LAUREA

in

Idraulica Marittima M

**TECNICHE DI MONITORAGGIO DEL LITORALE:
EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI LUNGO PERIODO
DELLA SPIAGGIA DI CATTOLICA (RN)**

CANDIDATO
Andrea Piva

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Barbara Zanuttigh

CORRELATORI:
Ing. C. Zoppi
Ing. N. De Nigris
Ing. M. Preti

Anno Accademico 2011/2012

Sessione I

INDICE

INTRODUZIONE	- 3 -
CAPITOLO 1: TECNICHE DI MONITORAGGIO	- 5 -
1.1 Obiettivi Del Monitoraggio.....	- 5 -
1.2 Requisiti Tecnici di un Programma di Monitoraggio	- 6 -
1.3 Rilievo della Spiaggia Emersa	- 9 -
1.3.1 Global Positioning System (GPS)	- 10 -
1.3.2 Rilievo Aerofotogrammetrico.....	- 12 -
1.3.3 Laser scanner terrestre	- 14 -
1.3.4 Lidar aerotrasportato.....	- 16 -
1.4 Rilievo della Spiaggia Sommersa	- 18 -
1.4.1 Sea sled, CRAB	- 18 -
1.4.2 Ecoscandaglio singlebeam.....	- 19 -
1.4.3 Ecoscandaglio multibeam.....	- 24 -
CAPITOLO 2: PROCESSI DI TRASPORTO SOLIDO	- 29 -
2.1 Cause del Trasporto Solido e Fattori Influenti.....	- 30 -
2.2 Trasporto Solido Cross Shore	- 35 -
2.3 Trasporto Solido Long Shore.....	- 41 -
2.4 Profilo di Equilibrio di un Litorale e Forme di Fondo.....	- 49 -
2.5 Effetti delle Opere sul Trasporto Solido	- 57 -
2.5.1 Opere trasversali	- 57 -
2.5.2 Opere parallele.....	- 60 -
CAPITOLO 3: SITO DI STUDIO: CATTOLICA	- 68 -
3.1 Clima Meteo-Marino	- 70 -
3.1.1 La Piattaforma PCB	- 71 -
3.1.2 La rete onda metrica Nazionale (RON).....	- 73 -
3.1.3 La boa di Ancona.....	- 74 -
3.1.3 La Boa NAUSICAA	- 77 -
3.2 Stato di Cattolica all'anno 2006.....	- 82 -
3.2.1 La rete topo-batimetrica.....	- 83 -
3.2.2 Metodi e strumentazioni	- 85 -
3.3 Profili della spiaggia di Cattolica del 2006.....	- 87 -

CAPITOLO 4: METODOLOGIA E RISULTATI	- 92 -
4.1 Estrazione dei Profili	- 92 -
4.1.1 Risultati.....	- 96 -
4.2 Calcolo dei Volumi.....	- 102 -
4.2.1 Risultati.....	- 104 -
4.3 Batimetrie.....	- 106 -
4.3.1 Risultati.....	- 107 -
4.4 Ipotesi di Riqualificazione barriere emerse	- 110 -
CONCLUSIONI	- 112 -
RINGRAZIAMENTI	- 113 -
BIBLIOGRAFIA	- 115 -

INTRODUZIONE

Il litorale Emiliano-Romagnolo e l'intero ecosistema costiero rivestono per la regione una funzione strategica che si misura su diversi piani.

Va ricordata innanzitutto la funzione di difesa fisica che la costa svolge per il nostro territorio, funzione la cui importanza viene accentuata dal cambiamento climatico in atto che si manifesta con eventi meteo estremi sempre più ricorrenti.

Lo stato del litorale e dell'ecosistema costiero influiscono in modo considerevole sulla conservazione dell'ambiente e sullo sviluppo di una parte importante dell'economia regionale [Errani 2007].

Lo stato di un litorale sabbioso ad esempio può variare repentinamente sotto l'azione di una mareggiata e ricomporsi nell'arco di un periodo di tempo più o meno lungo. Il suo equilibrio è quindi estremamente dinamico e dipende dall'interazione di diversi fattori, alcuni sono alla base del suo sviluppo, altri invece possono determinarne la crisi fino alla scomparsa [Preti et al. 2007].

Il monitoraggio dell'evoluzione delle spiagge riveste quindi un ruolo fondamentale in ogni politica territoriale in cui sia coinvolta la fascia litorale.

Dato che la spiaggia costituisce l'elemento di maggior valore economico del sistema costiero, lo studio della evoluzione dei litorali è fondamentale per la pianificazione di questa zona densamente popolata, economicamente interessante ma anche complessa e dinamica.

La regione Emilia-Romagna istituì quindi nel 1983-1984 reti di controllo dell'evoluzione della costa e dei principali fattori alla base del suo dissesto, così come indicato dal "*Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola*" di seguito denominato "Piano Costa 1981".

A partire dal 1983 sono state istituite e rilevate periodicamente, da Idroser prima e da ARPA poi, le reti per il controllo di: evoluzione della linea riva (1983, 1991, 1998 e 2006), evoluzione della spiaggia emersa e sommersa (1984, 1993, 2000 e 2006), subsidenza del territorio costiero (1984, 1987, 1993, 1999 e 2005). L'oggetto di questa tesi sarà duplice: analizzare le tecniche di monitoraggio utilizzate nelle varie campagne di rilievo del litorale Emiliano-Romagnolo, e l'elaborazione dei dati raccolti durante la campagna condotta da ARPA relativa

al monitoraggio della costa del 2012, che andranno ad arricchire i database delle campagne precedenti. In particolare verrà analizzata l'evoluzione della spiaggia di Cattolica emersa e sommersa, tenendo in considerazione la presenza di barriere emerse parallele alla costa e gli effetti che queste hanno sulla modellazione della spiaggia. Si propone inoltre un'ipotesi di riqualificazione delle ultime tre barriere emerse della spiaggia di Cattolica.

CAPITOLO 1

TECNICHE DI MONITORAGGIO

Il monitoraggio di un litorale e del tratto di mare antistante riveste una grandissima importanza nella definizione delle politiche di intervento e nella gestione della costa, che costituisce un elemento di grande valore economico, ma che risulta essere anche più fragile e più soggetta a variazioni morfologiche rispetto ad altre parti del territorio.

Tale dinamicità modifica e può indebolire la funzione protettiva dei territori retrostanti e le potenzialità di utilizzazione a fini turistico -ricreativi, pertanto lo studio dell'evoluzione dei litorali è fondamentale per la pianificazione di una zona così complessa e su cui si concentrano forti pressioni antropiche.

Appare quindi evidente come la valutazione dello stato fisico del litorale costituisca un indispensabile punto di partenza su cui basare le politiche territoriali, portando alla creazione di indicatori che consentano di stabilire lo stato di salute di un litorale tramite opportune campagne di monitoraggio [Monti 2008].

In questo capitolo verranno descritti quelli che sono gli obiettivi di una campagna di monitoraggio, i requisiti tecnici necessari e le tecniche di rilievo utilizzate sia per la spiaggia emersa che per quella sommersa.

1.1 Obiettivi Del Monitoraggio

Gli obiettivi diretti del monitoraggio comprendono:

- studio dell'evoluzione costiera a medio/lungo termine per l'impostazione di piani di sviluppo e di gestione;
- analisi del bilancio sedimentario del litorale per lo studio dei rapporti fra input fluviale e dispersione cross e long-shore dei materiali;
- studio dell'evoluzione costiera a breve termine per la valutazione dell'impatto delle opere marittime;
- studio dell'evoluzione costiera a breve termine per la valutazione dell'efficacia degli interventi di difesa;

- determinazione dell'estensione e della qualità dell'arenile ai fini dell'ottimizzazione degli usi e della determinazione dei canoni demaniali;
- compartecipazione dei dati con gli stakeholders per la certificazione degli obiettivi raggiunti nei processi di ICZM [Cicin-Sain, 1998].

La Gestione Integrata della Fascia Costiera (Integrated Coastal Zone Management/ICZM) è un processo decisionale continuo che ha lo scopo di risolvere i conflitti derivati dalla diversità di utilizzo di questa complessa parte del territorio. Fra i vari aspetti che un programma di gestione integrata della fascia costiera deve affrontare, vi sono la gestione delle spiagge, il controllo dell'erosione costiera e dei rischi naturali, per cui un input di dati specifici è necessario perché si possa condurre tal programma in una forma scientificamente coerente. Alcuni dei problemi tipici di gestione includono il controllo della erosione delle spiagge, la progettazione di ripascimenti artificiali, la realizzazione e il controllo di opere di difesa, la definizione di linee di *set-back* per la costruzione e quella di zone di rischio, che dipendono tutti della valutazione precisa della evoluzione morfodinamica costiera [Cicin-Sain, 1998]. L'impostazione di un sistema di monitoraggio dell'evoluzione costiera è quindi un momento importante nel processo di ICZM e l'efficacia dello stesso deriva dalla scelta della scala d'indagine, delle procedure di misura e della tempistica associata, parametri tutti che dipendono dagli obiettivi che si intendono raggiungere e dalla risorse finanziarie disponibili [Carli et al. 2004].

1.2 Requisiti Tecnici di un Programma di Monitoraggio

Una corretta impostazione dovrà quindi identificare le metodologie di rilievo e di analisi dei dati più idonee senza incorrere in un sovra-campionamento, spaziale e temporale, che rende più costoso il sistema.

Nell'impostazione del monitoraggio si dovrà quindi privilegiare:

- *la possibilità di acquisizione dei dati con la tempistica prevista.* Ciò è particolarmente importante nel monitoraggio di breve termine, quando devono essere acquisiti dati su sistemi in rapida evoluzione, come le spiagge soggette ad interventi di ripascimento o di stabilizzazione con opere a mare, nei quali le variazioni morfologiche possono essere estremamente rapide;
- *l'accuratezza dei dati.* Piccole variazioni morfologiche implicano lo spostamento di ingenti volumi di sedimenti e errori modesti nelle misure

determinano forti errori nella quantificazione dei processi coinvolti. In aggiunta, le identificazioni di errori di misura, anche grossolani, è estremamente difficile nella spiaggia sommersa e la variabilità morfologica del sistema, conseguente anche ad una singola mareggiata, rende impossibile la ripetizione della singola misura eventualmente sospettata di errore;

- *operatività dei sistemi di acquisizione.* La necessità di avere misure sinottiche su ampie superfici e in finestre temporali spesso assai ristrette (es. intervallo fra due mareggiate in periodo invernale) impone l'impiego di metodologie collaudate e rapidamente attuabili;

- *l'economicità delle procedure.* L'elevata frequenza dei rilievi necessaria per un monitoraggio di breve/medio termine e l'estensione temporale dei monitoraggi di lungo periodo, associata all'ampiezza delle zone che spesso è necessario mettere sotto osservazione, impongono la scelta di metodologie di rilievo economicamente sostenibili, anche per evitare che il monitoraggio possa essere interrotto per carenza di risorse finanziarie;

- *la velocità di elaborazione.* In molti casi è indispensabile poter disporre dei dati e delle loro elaborazioni in tempi estremamente rapidi. Alcuni sistemi di acquisizione (ad esempio dei dati rilevati da satellite) richiedono tempi relativamente lunghi per la fornitura del dato; altri (ad esempio quelli acquisiti con sistemi Lidar) hanno tempi di processo incompatibili con la necessità che talvolta si pone di prendere decisioni rapide in fasi operative di realizzazione dei progetti;

- *confrontabilità dei dati.* I dati devono essere acquisiti con procedure collaudate e ampiamente adottate, in modo che la loro validità sia universalmente accettata, sia dai soggetti direttamente coinvolti nei processi decisionali che dagli “*stakeholders*” le cui aspettative si basano sulle decisioni stesse. La confrontabilità dei dati consente anche lo scambio fra le varie esperienze, la valutazione e la comparazione fra diversi problemi esistenti e il confronto fra i risultati raggiunti in diversi interventi.

Nell'analisi dell'evoluzione costiera conseguente ad interventi di riequilibrio, siano essi basati su opere rigide che si ripascimenti artificiali, si richiede una definizione delle condizioni di partenza, non facili a determinare proprio per la variabilità intrinseca del sistema. Il rilievo *una tantum* della costa, spesso effettuato nel *momento zero* del monitoraggio, non consente di evidenziare

quelle dinamiche che vanno a sovrapporsi ai processi innescati dall'intervento e che possono ostacolare una corretta interpretazione dei dati e la corretta valutazione dell'efficacia dell'intervento. Quando si vanno ad effettuare interventi su litorali per i quali sono note solamente le tendenze di lungo periodo e non la variabilità di breve termine (es. stagionale), è quindi opportuno che il monitoraggio inizi assai prima del momento zero, in modo che possa emergere la variabilità intrinseca del sistema.

Altro aspetto fondamentale è la delimitazione della zona da sottoporre a monitoraggio e la definizione della scala dei documenti da produrre.

Per l'analisi delle tendenze evolutive di medio e lungo termine l'entità di riferimento è l'unità fisiografica, definita come quella estensione di spiaggia che non ha scambi sedimentari con tratti adiacenti. È solo all'interno di essa che si possono analizzare i flussi sedimentari e capire se determinate variazioni morfologiche sono dovute ad oscillazioni del sistema, ma non a perdite nette, o se invece non sono il prodotto di un deficit sedimentario alterato del sistema complessivo.

Monitoraggi impostati per valutare l'impatto di strutture costiere, in genere porti commerciali o turistici, devono avere come zona di studio un tratto di litorale di estensione almeno pari a un ordine di grandezza superiore a quella dell'opera, dato che solo l'impatto istantaneo dell'opera sui processi costieri si sviluppa per una lunghezza che va da una a tre volte la dimensione maggiore dell'opera.

È evidente che l'impatto dell'opera può alterare nel breve e medio termine le dinamiche sedimentarie del tratto posto immediatamente sottoflutto, ma che questo impatto può propagarsi in tempi più lunghi a tutta l'unità fisiografica. I tempi di analisi dei due processi e la scala spaziale del monitoraggio sono necessariamente diversi.

La rappresentazione cartografica dei parametri che descrivono le variazioni morfologiche intervenute può oscillare fra 1:1.000 e 1:5.000, ma è comunque richiesta una accuratezza planimetrica del dato digitale di 1-5 cm ed una altimetrica di circa 10 cm in modo da poter effettuare analisi estremamente accurate. Data la modesta energia del rilievo delle spiagge, sia nella parte emersa che in quella sommersa, fatta eccezione per le aree dunari, un errore nel posizionamento dei punti di 1-10 cm non determina significative deformazioni o stime inesatte dei volumi dei sedimenti di spiaggia. Un'accuratezza di 5 cm

nelle quote, e di 10 cm nei confronti fra coppie di rilievi, consente di evidenziare variazioni morfologiche nell'intorno delle opere, in genere di un ordine di grandezza superiore, ma non di effettuare accurate stime del bilancio sedimentario dei litorali. Infatti, per profili attivi di spiagge di ampiezza pari a 1000 m, un caso frequente lungo le coste italiane, l'incertezza risulta essere pari a circa 100 m^3 per metro lineare di spiaggia, una quantità analoga a quella che caratterizza ripascimenti del litorale di medie dimensioni [Carli et al 2004].

1.3 Rilievo della Spiaggia Emersa

Il rilievo della spiaggia emersa viene svolto per ottenere un set di dati piano – altimetrici tramite che permettono di descrivere la morfologia di una parte così delicata del territorio, dalla cui conoscenza è possibile condurre analisi sullo stato della parte emersa del litorale, quali il calcolo delle variazioni volumetriche e l'identificazione della posizione della linea di riva.

Il rilievo può avvenire tramite tecnologie appositamente sviluppate per il monitoraggio costiero o tramite tutte le usuali tecniche di rilievo che si usano nelle operazioni terrestri, quali:

- rilievo topografico tradizionale o tramite GPS;
- rilievo aerofotogrammetrico;
- rilievo tramite laser scanner a terra o aviotrasportato;
- rilievo tramite immagini satellitari.

Vediamo in dettaglio in cosa consistono queste tecniche di monitoraggio.

1.3.1 Global Positioning System (GPS)



Figura 1- Ricevitore GPS

Il rilievo GPS con ricevitori geodetici che registrano i dati per le misure di fase consente elevate precisioni nel posizionamento differenziale tra i centri di fase di 2 antenne poste agli estremi di una linea di misura (*baseline*) la cui lunghezza, orientata nel sistema cartesiano geocentrico, può essere determinata con precisione nell'ordine del centimetro.

I ricevitori possono utilizzare la sola frequenza L1 (monofrequenza) o entrambe le frequenze L1 e L2 (bifrequenza) dei segnali emessi dai satelliti del sistema; in questo caso la rapidità, l'accuratezza nella determinazione della posizione e la distanza massima raggiungibile rispetto alla stazione di riferimento vengono considerevolmente aumentate.

La portata utile, in dipendenza dal tipo di ricevitore e dal tempo di stazionamento che si è previsto di adottare in funzione della tipologia del rilievo, varia da 5 a 30 Km (con sistemi di collegamento tra stazioni di riferimento, tipo VRS (*Virtual Reference Stations*), si potranno estendere tali limiti). Le prospettive di ampliamento delle risorse costituite dalle reti di stazioni permanenti di riferimento gestite dagli enti pubblici territoriali sono un fattore importante, che potrà ulteriormente incrementare l'applicabilità e la produttività di questo sistema.

Il rilievo di spiaggia si presta particolarmente all'impiego delle misure GPS, in quanto le coste sabbiose italiane sono raramente caratterizzate dalla presenza di ostacoli fisici (alberi, edifici alti, etc.) che ostacolano la ricezione dei segnali emessi dai satelliti.

L'elevata precisione intrinseca (Brasington, 2000) e l'omogeneità della accuratezza dei dati di posizione che si possono ottenere con il metodo in questione determina una diffusione sempre maggiore dell'impiego del sistema GPS. Le già elevate caratteristiche di produttività vengono ulteriormente incrementate dai metodi "RTK" (*Real Time Kinematic*) che prevedono un collegamento (via radio, telefono o internet) tra i 2 ricevitori e consentono la determinazione di posizione e la quantificazione della sua precisione in tempi anche inferiori a quelli necessari al rilievo topografico eseguito con stazioni motorizzate.

Rispetto al rilievo topografico classico, si hanno i vantaggi della indipendenza dalla intervisibilità tra il punto di rilievo e la stazione di riferimento e l'incremento della distanza da quest'ultima; anche l'elaborazione dei dati avviene in modo relativamente semplice e non si corre il rischio di errori sistematici dovuti a problemi nelle fasi del rilievo di inquadramento. Come limite restano i problemi dovuti al cambio di DATUM cartografico e del riferimento altimetrico. La precisione può essere quantificata nell'ordine del centimetro per il posizionamento planimetrico ed altimetrico.

La operatività del rilievo può essere del tutto simile a quella dell'operatore che movimentata la stazione riflettente in un metodo topografico classico. Il rilievo, oltre in modalità "RTK" può essere fatto in cinematico-postelaborazione, permettendo, grazie ad una acquisizione veloce e continua dei dati, di rilevare l'arenile anche con modalità differenti rispetto alle classiche sezioni parallele.

Nel caso del rilievo della linea di riva si può ricorrere a una movimentazione con veicolo attrezzato (moto da spiaggia). Inoltre la modalità "RTK" permette all'operatore di percorrere in tempo reale la linea di riva direttamente sulla quota zero, consentendo così di effettuare il rilievo senza successive interpolazioni [Carli et al 2004].

1.3.2 Rilievo Aerofotogrammetrico

Il rilevamento fotogrammetrico stereoscopico è basato sulla restituzione di coppie di prese, solitamente con asse nadirale ed eseguite da un aereo. La zona comune a 2 fotogrammi viene analizzata con apposite apparecchiature (restitutori fotogrammetrici) che, attraverso le tre fasi di orientamento del rilievo (interno, relativo e assoluto), consentono la determinazione di posizione dei punti visibili. Per poter effettuare la restituzione di un rilevamento aerofotogrammetrico le prese devono quindi essere organizzate in “strisciate” lungo le quali i fotogrammi si sovrappongono l’uno all’altro oltre il 50% (solitamente al 60%).

Ultimamente è sempre più diffuso l’uso di camere metriche digitali. La fotogrammetria digitale ha forti analogie con il metodo analitico, in quanto utilizza il medesimo schema concettuale e spesso anche gli stessi algoritmi di calcolo e di compensazione. La principale differenza consiste nel materiale di partenza, cioè nell’impiego di immagini digitali ottenute per captazione diretta (camere digitali) o per scansione di immagini fotografiche.

Nel caso si proceda alla captazione diretta delle immagini mediante camere metriche digitali ad alta risoluzione, si hanno risultati di buon livello qualitativo, paragonabili a quelli della fotogrammetria analitica. In prima approssimazione si può prevedere, per le attrezzature di presa digitali metriche e per le scansioni “rigorose” dei fotogrammi analogici eseguiti con camere metriche, uno scarto quadratico medio sui risultati di posizione dei punti rilevati, pari a 1-3 pixel riportati al terreno. Per esempio, se il fotogramma ha una risoluzione tale che 1 pixel equivale a un quadrato di 8x8 cm sul terreno, la precisione del rilievo varierà tra 8 e 24 cm.

I problemi per il rilievo fotogrammetrico delle spiagge nascono dalla difficoltà nella determinazione dei punti omologhi sui 2 fotogrammi in assenza di particolari morfologici riconoscibili sul terreno. Infatti la sabbia, soprattutto se livellata meccanicamente, non presenta punti facilmente distinguibili uno dall’altro, per cui la visione stereoscopica risulta difficile e quindi poco precisa; si può quindi indicativamente pensare ad errori circa doppi di quelli che si ottengono su terreni con tessitura univoca (Casella, 2002).

Un altro problema si pone per la segnalizzazione e determinazione dei punti di appoggio necessari al riferimento cartografico del rilievo: in assenza di punti

facilmente identificabili sul terreno, soprattutto in prossimità della linea di riva, sarà necessario “attrezzare” preventivamente le prese con segnali artificiali di dimensioni adeguate i cui centri possono essere determinati con metodi topografici o mediante rilievo satellitare GPS.

Infine, resta da notare il problema economico conseguente alla forma fortemente allungata della zona di interesse: nei rilievi per cartografia a media scala la copertura dei fotogrammi eccede di molto l'ampiezza della spiaggia e ne deriva un certo “spreco” di risorse, in quanto viene elaborata solo una porzione assai limitata del territorio rappresentato. La conseguenza è un elevato costo di acquisizione e di elaborazione per unità di superficie interessata dal monitoraggio.

La diffusione sempre crescente di apparecchiature fotografiche digitali, dotate anche di risoluzione elevata, ma di basso costo relativo, fa propendere gli operatori al loro impiego nel rilievo fotogrammetrico, soprattutto per riprese che riguardano zone pianeggianti, quali appunto le spiagge (Fig. 9). Nei rilievi con metodiche fotogrammetriche non rigorose possono essere utilizzate attrezzature di presa dotate di proprietà metriche ridotte (cosiddette semi-metriche) e apparecchi di metricità non determinata (camere amatoriali, telecamere, scansioni di immagini parziali, ecc.).

L'errore nella determinazione della posizione dei punti restituiti da prese digitali semi-metriche può variare tra 3 e 10 pixel riportati al terreno. L'errore planimetrico, soprattutto su terreni pianeggianti, è di solito inferiore rispetto a quello inerente determinazioni di quota, che più risente degli effetti distorsivi dell'immagine.

In letteratura si hanno numerosi riferimenti a esperienze di immagini semi-metriche captate da aeromobile, tese a validare il sistema mediante raffronti con metodi già consolidati (Brasington, 2000; Baily, 2002; Judge, 2001) e si riportano precisioni variabili dai 20 agli 80 cm in quota; generalmente viene confermata una precisione migliore per le determinazioni planimetriche. Altri autori (Hancock, 2001) riportano l'impiego delle stesse attrezzature fotografiche per rilievi *close-range* (su modelli), mentre un orientamento critico abbastanza interessante emerge dal contributo di (Henry, 2002) che raffronta le varie metodologie di ripresa di foto aeree (con velivolo attrezzato per prese metriche, con elicottero, con ultraleggeri o con piccoli aerei radioguidati), variando le

altezze di volo e le camere da presa; tuttavia le precisioni ottenute non vengono quantificate e si rimanda ad esperienze dirette che, di caso in caso, consentono una verifica delle scelte di progetto, in armonia con quanto già riportato in questo paragrafo.

Per quanto riguarda le camere amatoriali non metriche, si raccomanda un uso per il solo rilievo planimetrico (es. linea di riva) utilizzando un maggior numero di punti di controllo a terra (GCP) ed evitando le determinazioni in quota che, come abbiamo visto, sono più sensibili ai fenomeni discorsivi [Carli et al 2004].

1.3.3 Laser scanner terrestre



Figura 2- Riflettore Laser

Lo scanner terrestre nasce dall'abbinamento di un distanziometro laser a impulsi con uno strumento topografico (goniometro) motorizzato e dà la possibilità di determinare la posizione spaziale di una serie di punti equidistanziati in azimut ed elevazione.

Si ha così la generazione di una cosiddetta "immagine solida" o "modello". L'immagine viene captata da un sensore rotante (scanner) che rileva il colore (o il tono di grigio) del "punto" considerato e la sua posizione spaziale relativa al "centro" dello strumento, solitamente espressa con una terna di numeri corrispondenti alle coordinate cartesiane. Ciascun pixel che compone l'immagi-

ne è cioè associato a una posizione nello spazio per cui, con opportuni programmi, è possibile visualizzare l'assetto tridimensionale del terreno rilevato.

La analogia tra gli scanner terrestri e gli strumenti topografici motorizzati (Stazione Totale) è molto stretta: infatti la principale e quasi unica differenza consiste nella eliminazione del cannocchiale e nella sua sostituzione con un "raggio" laser capace di effettuare le misure di riflettanza e di distanza (talvolta anche colorimetriche) in frazioni di secondo (la frequenza di acquisizione va da 1 a 100 KHz circa); questi dati vengono associati ai valori angolari di direzione azimutale e zenitale e registrati nella memoria dello strumento in tempi decisamente contenuti. Ne consegue la possibilità di ottenere in pochi minuti quantità rilevanti di dati (milioni di punti). La precisione di misura, negli strumenti più recenti, è simile a quella degli strumenti topografici, quindi nell'ordine del centimetro, mentre la portata utile può variare da qualche decina a qualche centinaio di metri a seconda dei modelli.

La relativa facilità di esecuzione delle misure e la grande quantità di informazioni che si possono acquisire in tempi decisamente più brevi di quelli necessari al rilievo topografico classico forniscono una indicazione positiva per l'impiego di questo metodo nel rilievo di scogliere o di opere morfologicamente complesse, che possono essere descritte cioè solo con una elevata densità di punti per unità di superficie.

1.3.4 Lidar aerotrasportato

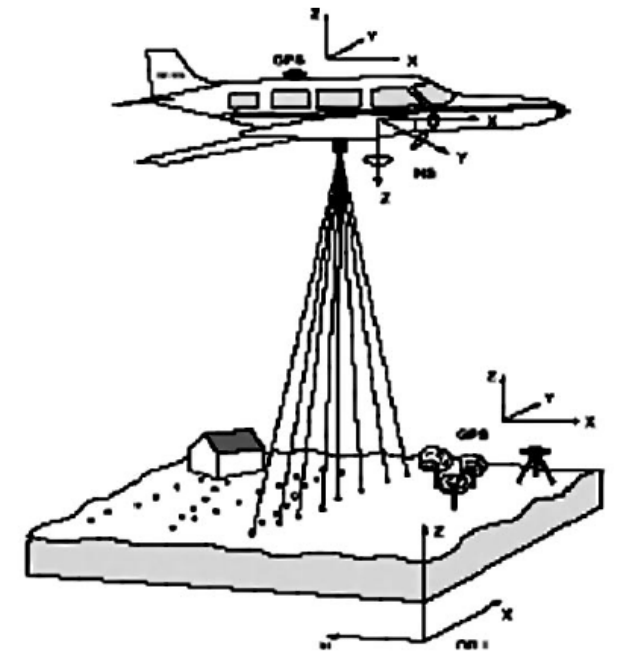


Figura 3- Funzionamento LIDAR

L'*airborne laser scanning* è una metodologia di rilievo basata sulla scansione del territorio sorvolato da un aereo o da un elicottero per mezzo di un telemetro laser, che determina la distanza fra il punto di emissione, di fatto un telemetro, e il punto di riflessione costituito dal suolo..

Il telemetro misura il tempo di andata e ritorno che l'impulso laser, riflesso dal terreno, impiega a percorrere il suo percorso. Il telemetro opera mediante un generatore di frequenza, che può essere pensato come una sorta di metronomo (*clock*) che scandisce con regolarità (fino a 8-10 GHz) il fluire del tempo; la distanza fra strumento e target è una semplice funzione del tempo che intercorre tra l'emissione e la ricezione del segnale riflesso (dato che la velocità di propagazione della luce è nota e può essere considerata costante).

Lo scanner laser non si limita a misurare la distanza fra strumento e terreno, ma fornisce le coordinate dei vari punti riflettenti. Perché questo sia possibile, si deve conoscere la posizione e l'assetto dell'aeromobile in ogni istante. Il GPS è in grado di fornire autonomamente le coordinate dell'aereo, ma nel caso della scansione laser è necessario conoscere anche l'orientamento del mezzo sul quale il telemetro è montato: a ciò provvede un sensore integrato GPS/IMU.

La precisione che può essere ottenuta con queste apparecchiature e la densità dei punti rilevati per unità di superficie sono evidentemente legati alle caratteristiche dei vari componenti la attrezzatura di misura e di controllo, ma anche alla quota di volo. Infatti l'angolo di abbracciamento della strisciata non può superare un valore determinato per ciascun modello di scanner; anche la frequenza di acquisizione dei punti ha un limite e varia con l'altezza relativa al suolo del sensore (prima di emettere un secondo raggio, il riflesso del primo deve essere ricevuto), per cui più bassa è la quota di volo, più densa è la matrice dei punti rilevati.

Di fatto, questa considerazione pone dei limiti operativi al metodo, in quanto la produttività più elevata si otterrebbe con quote relativamente alte (maggiore abbracciamento, minor numero di strisciate, minore inclinazione dei raggi di misura a parità di superficie rilevata), mentre a queste si associa una minor densità angolare dei raggi e una minor precisione nelle determinazioni di posizione (gli errori dovuti alle incertezze sui parametri angolari di orientamento del raggio laser influiscono negativamente sulla posizione planimetrica dei punti rilevati).

Per quanto riguarda la precisione nella determinazione dei punti, in letteratura (French, 2002; Charlton, 2003) si hanno esperienze che la quantificano, mediante raffronti con rilievi topografici e/o GPS diretti, tra i 10 e i 40 cm in altezza; valori più precisi si ottengono per la planimetria. Soprattutto l'esperienza comparativa condotta dall'Università di Pavia (Casella, 2000 e 2002) fornisce dati di notevole interesse e analizza i meccanismi di generazione degli errori suddividendoli in una parte sistematica (± 4 cm) e in una accidentale (± 6 cm). Huising (1998) propone accorgimenti simili a quelli impiegati nella fotogrammetria digitale (GCP, sovrapposizione tra strisciate contigue) per ridurre gli errori sistematici. Nel caso dei rilievi di spiagge questi accorgimenti sono indispensabili, data la rilevante influenza degli errori sistematici nei calcoli dei volumi e delle loro variazioni nel tempo.

Altri autori, oltre al già più volte citato gruppo di Casella, analizzano raffronti di precisione con la fotogrammetria analitica o digitale, mostrando risultati univocamente a favore del sistema LIDAR per quanto riguarda la precisione e la completezza del rilievo [Carli et al. 2004].

1.4 Rilievo della Spiaggia Sommersa

1.4.1 Sea sled, CRAB

La sea sled è una slitta (con varianti su ruote) sulla quale è posta un'asta graduata in posizione verticale. La slitta, che poggia sul fondo del mare, viene prima trainata verso il largo da una imbarcazione e poi trascinata verso riva tramite un verricello la cui rotazione segna la lunghezza del cavo recuperato e quindi del tratto che via via viene coperto dalla slitta. L'asta che emerge dalla superficie del mare indica la profondità dell'acqua, che viene letta da terra con un cannocchiale.

Con questo sistema si possono eseguire profili di spiaggia di buona precisione (3 cm in quota), ma l'operatività è ridotta ed i tempi di esecuzione sono assai lunghi [Carli et al.]. Il sistema, molto utilizzato negli Stati Uniti, ha trovato una ridotta applicazione in Europa e non risulta che in Italia siano mai state costruite o adottate slitte di questo tipo.

Sono stati sviluppati anche veicoli semoventi in grado di acquisire la propria posizione e profondità, fra i quali il CRAB (Coastal Research Amphibious Buggy, (Figura 4) è il più collaudato [Carli et al.].

Tale strumento consiste in un tripode che sorregge una piattaforma posta a 10.7 m d'altezza e che si muove su grandi ruote grazie ad un motore idraulico, che consente una velocità massima di 3.2 km/h su terra.

La posizione del CRAB viene determinata tramite GPS cinematico [Carli et al.] oppure tramite una serie di prismi che fungono da bersagli per il sistema laser elettronico di posizionamento [www.frf.usace.army.mil].

Il CRAB può essere utilizzato con altezze d'onda sino a 2 m, sebbene in tali condizioni la presenza delle ruote possa generare erosioni locali nel caso in cui si lasci immobile la macchina, che inoltre non può essere usata in fondali limosi o di materiale incoerente [www.frf.usace.army.mil].



Figura 4- Esempio di CRAB in azione sulle coste statunitensi

1.4.2 Ecoscandaglio singlebeam

Il rilievo batimetrico con ecoscandaglio singlebeam, il sistema attualmente più diffuso per effettuare i rilievi idrografici, viene eseguito con una imbarcazione opportunamente attrezzata e di ridotto pescaggio, capace quindi di operare anche in bassi fondali, che percorre a bassissima velocità le rotte di progetto, generalmente appartenenti a due tipologie:

- linee perpendicolari alla linea di riva;
- cross lines parallele alla linea di riva.

Mentre le prime rappresentano il proseguimento delle sezioni utilizzate per il rilievo della spiaggia emersa, le seconde vengono effettuate per avere un controllo delle quote agli incroci ed informazioni sull'andamento del fondale tra

una sezione ed un'altra, soprattutto in presenza di opere di difesa costiera parallele alla costa.

Per le caratteristiche del sistema di acquisizione, il rilievo risultante ha una conformazione lineare, mentre la spaziatura dei punti dipende direttamente dalla velocità con cui si muove l'imbarcazione (Figura 5).



Figura 5 - Imbarcazione con singlebeam

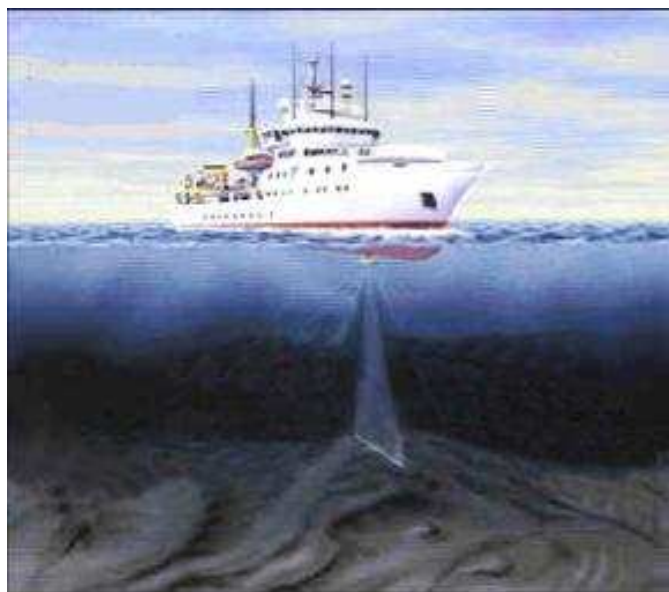


Figura 6 - Funzionamento Singlebeam

Con il termine SBE non si indica tuttavia il solo trasduttore, ma un sistema integrato volto al rilievo tridimensionale di punti collocati sul fondale marino, in cui ogni componente viene compensata per eliminare gli errori indotti dal fatto che il rilievo non avviene direttamente sulla superficie di interesse, ma attraverso il volume d'acqua.

Il sistema integrato SBE è quindi composto dai seguenti apparati:

- sistema di posizionamento superficiale (DGPS, RTK, sistemi ottici, ...);
- sistema di acquisizione ed elaborazione dati composto da hardware e software dedicati;
- ecoscandaglio idrografico (Figura 7);



Figura 7 - Ecoscandaglio idrografico Odom Hydrotrac

- compensatore d'onda per la correzione delle profondità rilevate in relazione al moto ondoso;
- sistema inerziale per la valutazione dell'assetto dell'imbarcazione e per la correzione delle profondità rilevate in funzione dei movimenti di rollio e beccheggio del trasduttore dell'ecoscandaglio;
- sonda CTD per misurare la velocità del suono in acqua;

L'uso di un GPS in modalità RTK offre notevoli vantaggi in quanto, oltre alle coordinate planimetriche, calcola anche la quota assoluta del trasduttore in tempo reale e con precisione centimetrica. Diventa quindi possibile, in abbinamento con i dati provenienti dall'ecoscandaglio, correggere automaticamente durante il rilievo batimetrico tutte le oscillazioni della superficie marina, ovvero marea, onde e sovrizzo dovuto alla massa d'acqua spinta dal vento [BeachMED, 2005]. Gli ecoscandagli singlebeam generalmente utilizzati sono di tipo idrografico con risoluzione digitale di 1 cm ed operano tramite un singolo impulso sonoro emesso dal trasduttore che, una volta riflesso dal fondo, viene rilevato dalla sonda.

Il tempo di ritorno del segnale dipende dalla velocità del suono in acqua, motivo per cui si necessita della sonda CTD, tuttavia la determinazione della velocità

del suono in acqua risulta essere una delle procedure più difficili di tutta l'operazione, infatti nelle acque basse la temperatura e la salinità variano notevolmente ed un aumento di 5°C in 5 m di profondità può causare un errore fino a 0.1 m [Carli et al.]

La velocità del suono varia quindi con la densità e le proprietà elastiche dell'acqua che sono funzione della temperatura, dei materiali in sospensione o disciolti e della salinità. L'ecoscandaglio deve quindi essere tarato o impostando le caratteristiche fisiche del mare al momento del rilievo, quindi per la temperatura dell'acqua e la salinità, o direttamente tramite il metodo *bar check*, ovvero facendo riferimento ad una apposita piastra metallica calata in acqua a profondità nota.

Nonostante i rilievi si effettuino solitamente a mare completamente calmo, l'uso di un sistema inerziale che permetta di correggere il dato per il rollio ed il beccheggio dell'imbarcazione è assolutamente necessario, anche se non sempre viene utilizzato.

La non corretta valutazione dell'assetto dell'imbarcazione può infatti portare a errori anche notevoli nelle misure: ad esempio, un errore di 8° nella misura dell'inclinazione a 10 metri di profondità causa un errore di 0.1 m sulla quota e 1.5 m sulla planimetria [Carli et al.], come spiega bene la Figura 8 .

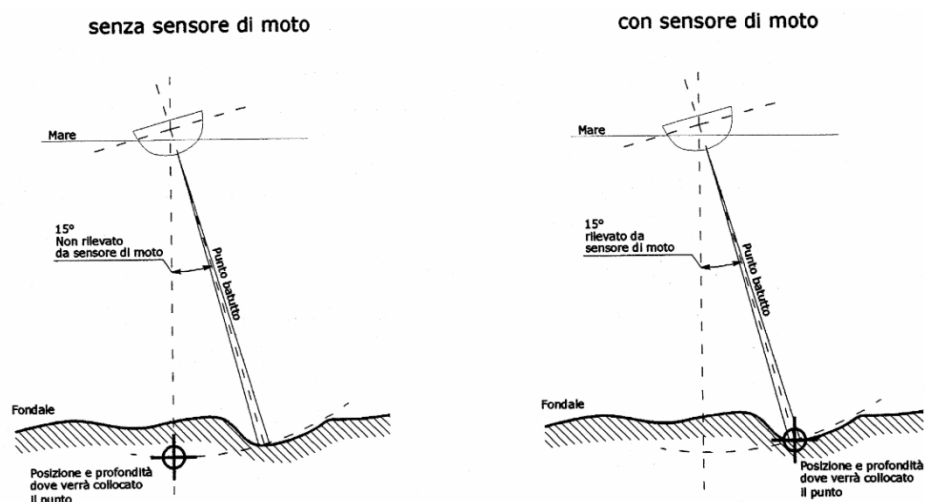


Figura 8 - Rilievo con e senza sistema inerziale

Per quanto riguarda l'ecoscandaglio, la frequenza adottata è generalmente di 200 kHz, sebbene il range di utilizzo vari da 100 a 1000 kHz, tuttavia il valore di 200 kHz rappresenta un buon compromesso per garantire un rilievo accurato del fondale con poca interferenza della colonna d'acqua, infatti maggiore è la

frequenza di lavoro, minore è la penetrazione del raggio nella sabbia, quindi si riduce l'errore nella determinazione della reale posizione del fondale.

Anche il cono di apertura del segnale dei vari trasduttori influenza notevolmente la precisione del rilievo, poiché l'area di fondale investita dal raggio dal sonar, detta impronta al fondo, risulta uguale a

$$A = \pi \tan^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot d^2 \quad (1)$$

dove d è la profondità ed α rappresenta l'angolo in gradi di illuminazione del segnale.

Una minore impronta del raggio sul fondo aumenta la probabilità di interpretare correttamente punti caratterizzati da una brusca discontinuità del dato batimetrico, ovvero al diminuire dell'area investigata si riduce l'effetto di appiattimento dei dati, come spiega la Figura 9.

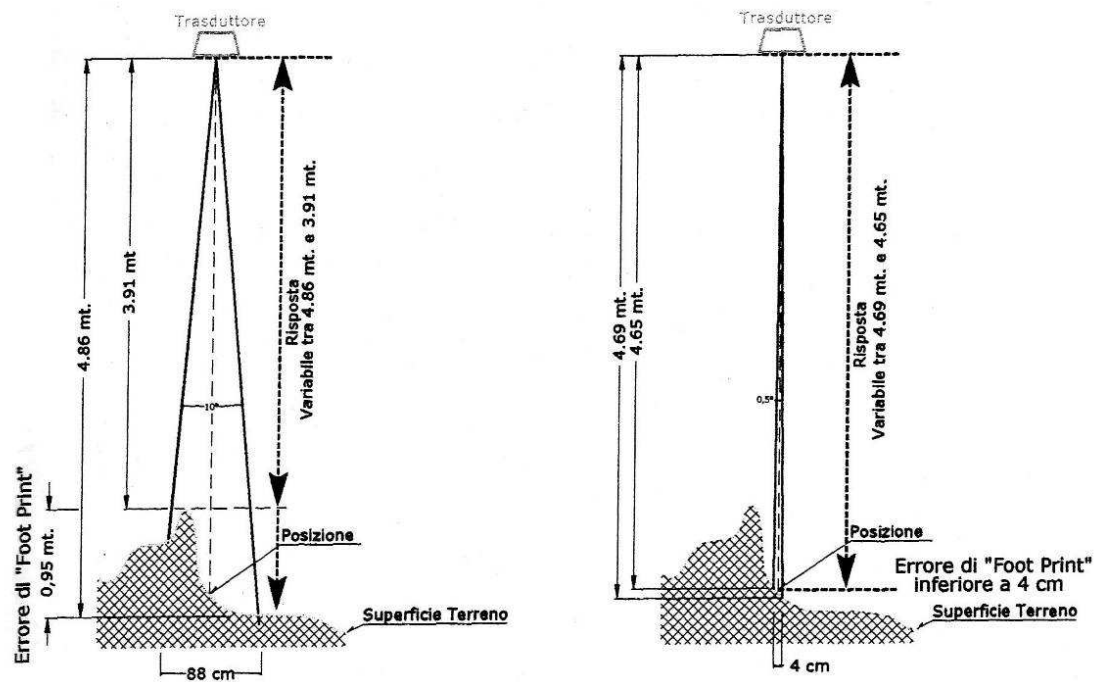


Figura 9 - Errori di "footprint" per raggi emessi di 10° e 0.5°

L'errore probabile sulle misure di profondità, tenendo conto anche dell'errore proprio di un ecoscandaglio di precisione, può essere stimato in condizioni ottimali pari a circa ± 7 cm [Carli et al.].

1.4.3 Ecoscandaglio multibeam

Il sistema multibeam è una tecnologia che consente di avere una mappatura ad alta definizione del fondale marino investigato grazie alla mole di dati che si riesce ad acquisire, nettamente superiore a parità di tempo rispetto a quella che si può ottenere tramite un ecoscandaglio singlebeam.

Il MBE opera sfruttando gli stessi fenomeni fisici utilizzati dall'ecoscandaglio singlebeam, pertanto consiste in un sonar acustico che rileva l'eco di ritorno proveniente dal suono emesso dal trasduttore e riflesso dal fondo, tuttavia il sistema è composto da tanti sensori anziché da uno solo.

Un ecoscandaglio multibeam, infatti, anziché rilevare tramite un solo raggio come il singlebeam, ne utilizza contemporaneamente 60, 100 o 240 a seconda della sua apertura angolare. [Carli et al.].

Da ciò deriva che il rilievo risultante non è più la proiezione sul fondale della rotta seguita dall'imbarcazione, ma consiste in una striscia il cui asse continua a seguire la traccia della rotta e che si sviluppa perpendicolarmente a tale asse per una ampiezza a , detta swath, pari a

$$l = 2d \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2)$$

dove d è la profondità del fondale, mentre α è l'apertura angolare su cui vengono emessi i beams.

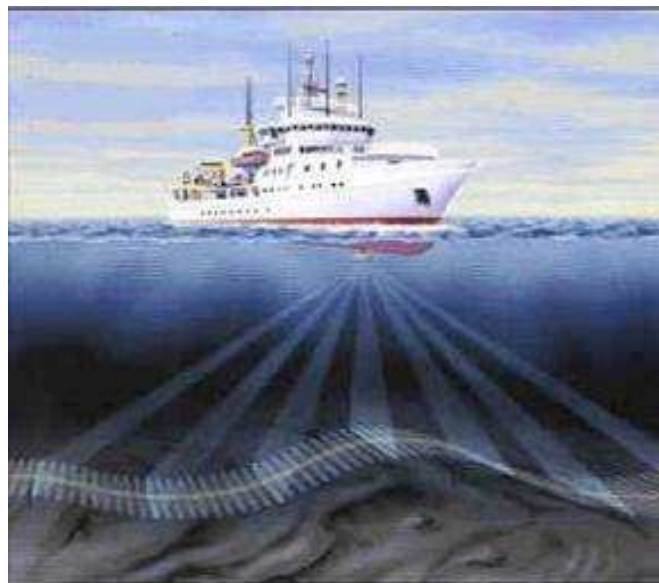


Figura 10 - acquisizione dati tramite Multibeam

Ad esempio uno strumento con apertura di 90° rileva una porzione di fondale pari a due volte la profondità presente al di sotto del trasduttore, mentre con un'apertura di 150° si arriva fino a 7.5 volte.

La spaziatura tra i singoli segnali, a sua volta, determina il grado di risoluzione spaziale con cui lo strumento è in grado di rilevare gli oggetti presenti sul fondo, mentre la frequenza con cui questi beams sono emessi dipende dalle condizioni in cui si realizza il rilievo: le basse frequenze (12 kHz) sono utilizzate per rilevare il fondale nelle profondità oceaniche, mentre quelle alte (300 kHz o più) sono impiegate in caso di profondità inferiori ai 20 m [Hopkins, 2007].

In ogni istante il fascio emesso e rilevato dal trasduttore di un multibeam deve essere posizionato correttamente rispetto al sistema di riferimento utilizzato per eseguire i rilievi, quindi anche per il sistema multibeam si deve fare riferimento ad un sistema integrato, composto da:

- sistema di posizionamento GPS in tempo reale;
- sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati (Figura 11);
- ecoscandaglio multibeam;
- compensatore d'onda;
- sistema inerziale;
- sonda CTD;



Figura 11 - sistema di acquisizione ed elaborazione dati su imbarcazione multibeam

Analogamente a quanto avviene per il SBE, le strumentazioni ausiliarie hanno il compito di correggere il dato rilevato dall'ecoscandaglio tramite le informazioni riguardanti l'orientamento del fascio del multibeam, i movimenti del trasduttore dovuti al moto ondoso, al rollio ed al beccheggio dell'imbarcazione, e la velocità di propagazione del suono lungo la colonna d'acqua.

L'assenza di questi strumenti produce errori notevoli, come si può vedere dall'esempio riportato in Figura 12.

A differenza del SBE, il posizionamento deve essere necessariamente realizzato tramite un sistema GPS RTK, poiché è l'unica tecnologia in grado di rilevare la posizione del centro di fase dell'antenna con precisione centimetrica ed in tempo reale, condizione che risulta essere essenziale per poter georeferenziare ogni singola distanza misurata dai beams di cui è composto il trasduttore [Geosystem].

Infatti l'associazione temporale tra dato di posizione e dato batimetrico è affetta da un gap temporale che deve essere quantificato e ridotto il più possibile, poiché l'errore introdotto da questo fenomeno provoca un innalzamento del valore batimetrico misurato che cresce al crescere della velocità dell'imbarcazione [Hopkins, 2007].

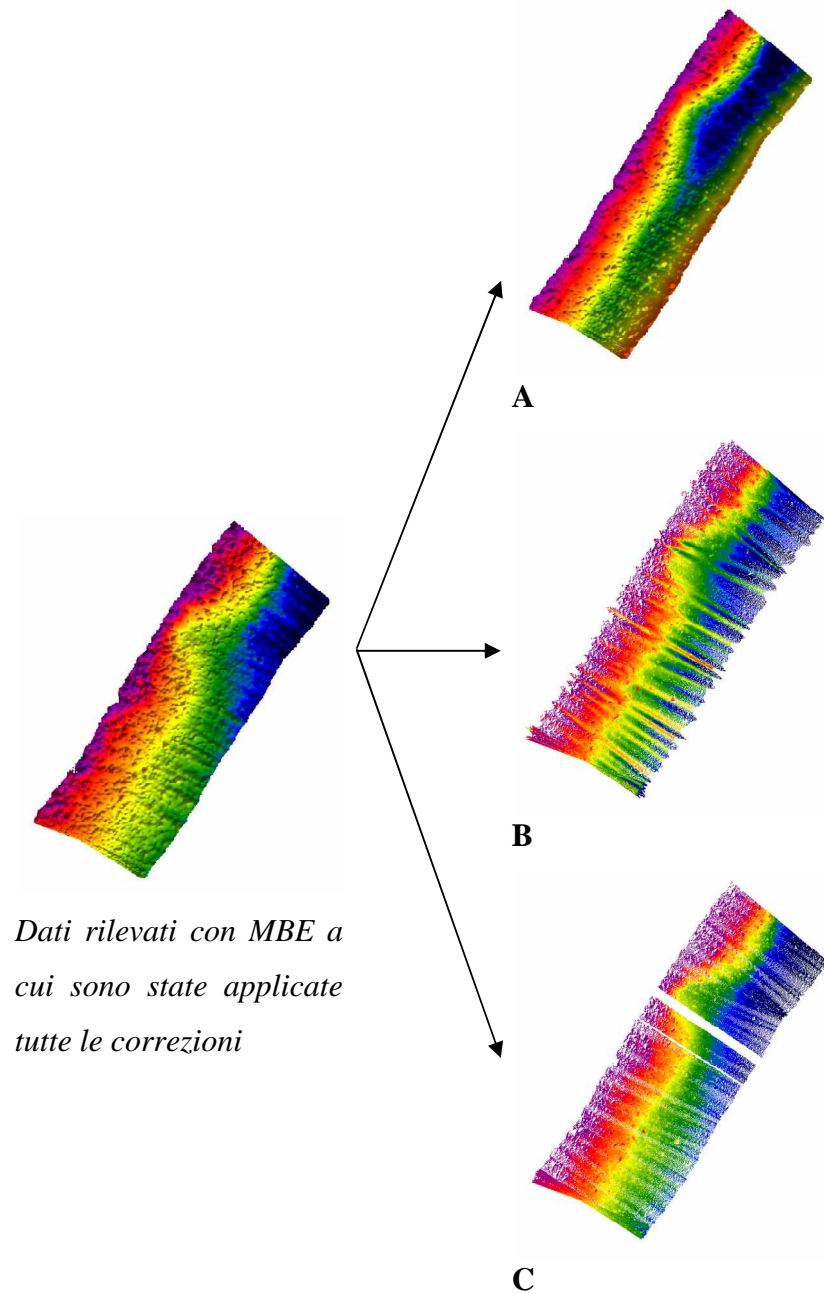


Figura 12 - Esempio di correzione errata o assente dei dati grezzi. Nel caso A il DTM è stato generato con valori corretti con un errato valore della velocità di propagazione del suono; il caso B mostra i dati rilevati in assenza di sistema inerziale; il caso C mostra l'effetto della perdita di segnale del GPS.

I dati misurati dai singoli strumenti sono gestiti da un sistema di navigazione ed acquisizione che provvede ad associare ad ogni distanza misurata dal trasduttore una terna corretta di valori X, Y e Z nel sistema di riferimento utilizzato.

Il criterio di acquisizione dati multibeam si basa sulla copertura totale dell'area da indagare, copertura che è ottenuta tramite una maglia di acquisizione definita in fase di progettazione del rilievo, costituita da celle di ampiezza prefissata.

Durante l'acquisizione, ogni volta che il sistema rileva un punto ricadente all'interno di una cella, esegue la media di tutte le misure effettuate e fornisce la profondità media per quella unità di superficie [Carli et al.].

Al termine del processo tutta l'area indagata sarà uniformemente coperta da una distribuzione di punti avente una densità tale da consentire la definizione con un alto grado di dettaglio dell'intera batimetria della zona.

Il MBE presenta però due svantaggi [Carli et al.]:

- scarsa operatività nei bassi fondali, che ne limita l'utilizzo a profondità maggiori di 1.5 - 2 m;
- falsa rifrazione indotta dalla presenza di pendii laterali estremamente ripidi.

Infine vale la pena di citare la tecnologia GeoSwath, ovvero un sonar che rileva l'angolo con cui il fronte d'onda riflesso torna al ricevitore. Ciò è reso possibile dalla misura della fase del segnale di ritorno (interferometria) e dalla conoscenza della geometria del trasduttore e della lunghezza d'onda.

Associando tali dati al range di andata e ritorno del segnale, è possibile stabilire la posizione del punto rilevato [Submetrix, 2000].

Tipicamente i sistemi GeoSwath coprono un'ampia fascia di fondale, pari a 10-30 volte la profondità [Carli et al.], con una notevole risoluzione, operando a 100, 250 o 500 kHz [Hopkins, 2007] e sono particolarmente adatti per operare in bassi fondali, laddove i sistemi multibeam incontrano difficoltà.

CAPITOLO 2

PROCESSI DI TRASPORTO SOLIDO

Per trasporto solido s'intende la capacità da parte del mare di spostare ingenti quantità di materiale da un punto ad un altro del fondale, nonché di modellare continuamente il profilo della spiaggia con un ininterrotto scambio di sabbia tra la parte emersa e quella sommersa della spiaggia stessa.

Lo studio di questa azione marina riveste una grandissima importanza, poiché proprio dall'analisi del trasporto solido si possono conoscere le cause ed i meccanismi che producono l'erosione di un litorale, con tutto ciò che ne consegue per l'entroterra retrostante, o, al contrario, l'accumulo di notevoli quantità di sedimenti, che generalmente risulta problematico in prossimità dei porti.

Infatti l'azione del trasporto solido assume grande rilevanza nello studio di numerosi problemi di ingegneria costiera, quali ad esempio:

- l'evoluzione del profilo di spiaggia durante le mareggiate ed in risposta alle variazioni di livello del mare;
- la risposta di un litorale al ripascimento;
- la variazione della posizione della linea di riva;
- la risposta del fondale alla presenza di opere rigide.

In questo capitolo si descriveranno le cause ed i fattori che influenzano il fenomeno, quindi si analizzeranno i prodotti dell'erosione e dell'accumulo e la leggi che regolano il trasporto sia lungo riva che perpendicolarmente ad essa. Infine si valuterà come le opere di difesa costiere interferiscono con il naturale evolversi della costa.

2.1 Cause del Trasporto Solido e Fattori Influenti

Molti sono i fattori che generano il trasporto solido, tuttavia vi è uno schema generale su cui basare tutte le considerazioni: la causa prima del trasporto solido è l'azione ondosa, a cui vanno aggiunte in secondo luogo le correnti, indipendentemente dalla loro genesi.

L'energia liberata dal frangimento delle onde fa sì che i sedimenti adagiati sul fondo vengano sospesi, alterando così la morfologia del fondale.

Una volta portato in sospensione, il materiale viene trasportato lungo riva e perpendicolarmente alla stessa dall'azione delle correnti, siano esse dovute al frangimento delle onde, alla marea o all'attrito che il vento esercita sulla superficie marina.

Il vento inoltre contribuisce al modellamento della spiaggia anche spostando i granuli di sabbia presenti sulla parte emersa del litorale, tuttavia nella seguente trattazione ci si concentrerà solamente sull'azione marina.

Analizzando le cause che generano il trasporto solido, si vede immediatamente che affinché possa realizzarsi uno spostamento, ogni singolo grano di sedimento deve essere turbato dal suo stato d'equilibrio e portato in sospensione, e ciò può avvenire solamente nella zona in cui frangono le onde, detta *surf zone*, poiché è necessaria una liberazione di energia per alterare lo stato del fondale.

Diventa quindi importante definire l'estensione della *spiaggia attiva*, cioè quella porzione di litorale soggetta a variazioni morfologiche, tuttavia si deve distinguere la zona che viene modificata durante eventi di breve periodo da quella che è influenzata da fenomeni a lungo termine.

Durante una mareggiata con acqua ed onde alte il limite della spiaggia attiva verso il largo è quello in cui quantità significative di sedimenti sabbiosi vengono trasportati e depositati, e solitamente viene considerata come tale la *profondità di frangimento* h_b in relazione all'altezza d'onda significativa [Dean et al., 2006], cioè la profondità oltre la quale l'onda considerata rappresentativa non può propagarsi senza frangere.

Invece la zona di modellamento della spiaggia sul lungo periodo, ingegneristicamente molto più rilevante di quella a breve termine, inizia alla profondità in cui le onde frangono eccezionalmente, detta *profondità di chiusura* h_c .

Tramite dati di campo e prove di laboratorio, Hallermaier ha definito per i sedimenti una condizione di moto incipiente in relazione a condizioni ondose relativamente rare, da cui ha ottenuto un criterio esprimibile come

$$\frac{h_c}{H_{12}} = 2.28 - 10.91 \frac{H_o}{L_o} \quad (3)$$

in cui H_{12} è l'altezza d'onda significativa superata per 12 ore all'anno, ovvero per lo 0.14% del tempo, mentre H_o e L_o sono rispettivamente l'altezza e la lunghezza d'onda al largo della *linea dei frangenti* o *breaker line* [Zanuttigh, 2007].

Per quanto riguarda l'estensione della spiaggia attiva verso l'entroterra, sia che si considerino condizioni a breve o lungo termine, si deve fare riferimento alla risalita dell'onda sul litorale, cioè al *run up*, che dipende sia dalle caratteristiche dell'onda al largo, nonché dalla pendenza della spiaggia.

Il run up può essere valutato come

$$R_U = \xi_o H \quad (4)$$

dove H è l'altezza d'onda, mentre il termine ξ_o è il *parametro di Iribarren – Battjes* valutato al largo, tramite cui si classifica la tipologia dei frangenti in base alle caratteristiche dell'onda, ovvero l'altezza e la lunghezza, e alla pendenza del fondale α secondo la relazione [Zanuttigh, 2007]:

$$\xi = \frac{tg(\alpha)}{\sqrt{H/L}} \quad (5)$$

Il valore del parametro di Iribarren – Battjes identifica tre categorie di frangente con caratteristiche differenti (Figura 13):

1. $\xi < 0.5$: *spilling*, caratterizzato da turbolenza sulla cresta dell'onda;
2. $0.5 < \xi < 3.3$: *plunging*, onda in cui la cresta ricade nel cavo e si crea turbolenza nella parte bassa della colonna d'acqua;
3. $\xi > 3.3$: *surging*, in cui la turbolenza è generata dall'attrito sul fondo.

A parità di altezza e lunghezza d'onda, il valore di ξ aumenta con l'aumentare della pendenza del fondo, perciò il frangente *spilling* è caratteristico di fondali piatti, mentre quello *surging* si sviluppa su elevate pendenze.

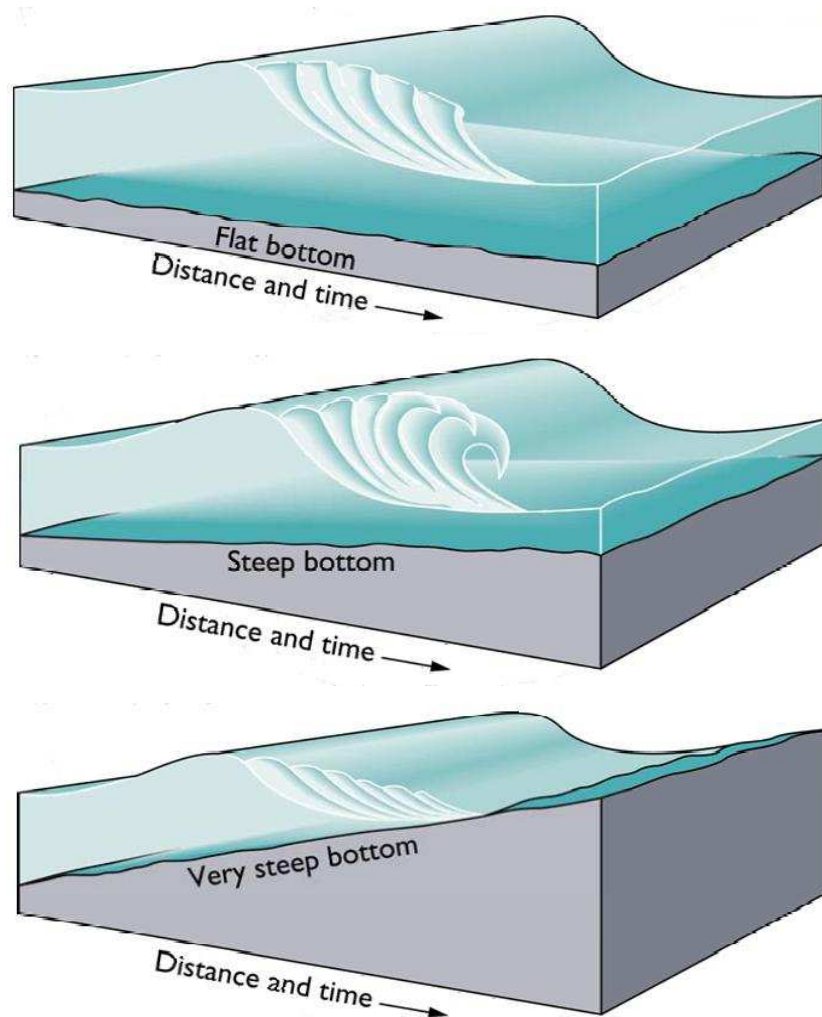


Figura 13 - Tipologie di onda caratterizzate dal valore crescente del parametro di Irribarren: dall'alto, frangente spilling, plunging e surging.

Individuati gli estremi della spiaggia attiva, si può suddividere il profilo trasversale in tre zone caratterizzate da diverso comportamento; sostituendo nelle equazioni sopra riportate valori caratteristici delle onde e dei fondali tipici della costa Romagnola, ad esempio $H_0 = 1$ m, $L_0 = 30$ m e $\text{tg}[\alpha] = 10 - 20\%$, si ottengono estensioni che per le tre zone valgono :

1. zona di risalita 1 – 1.5 m;
2. zona intertidale 0.5 – 0.8 m;
3. zona fino alla profondità di chiusura 5 – 6 m.

Quindi, lungo le coste basse e sabbiose di un bacino chiuso e poco profondo come il Mare Adriatico, l'estensione in quota della spiaggia attiva può essere valutata tra i 6 e gli 8 m [Zanuttigh, 2007].

Nel definire la zona in cui si verificano le variazioni morfologiche, si sono evidenziati come fattori influenti l'altezza e la lunghezza d'onda e la pendenza

della spiaggia, tuttavia anche la granulometria e le caratteristiche del materiale componente il litorale contribuiscono a determinare le modalità e la propensione alla sospensione dei granuli.

Sotto le ipotesi pienamente soddisfatte di fondo piatto e particella completamente sommersa, un generico granello di sabbia adagiato sul fondo, è sottoposto alle seguenti forze (Figura 14):

- peso proprio $G = \rho_s \cdot g \cdot V$;
- spinta di galleggiamento $P = \rho_w \cdot g \cdot V$;
- spinta idrodinamica $F = \frac{1}{2} \rho_w \cdot c_d \cdot u^2 \cdot A$;
- attrito con le particelle circostanti $R = c_a \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot V$

dove ρ_s e ρ_w indicano rispettivamente la densità del materiale di cui è costituita la particella e dell'acqua, V ed A sono il volume e l'area trasversale del granello, mentre c_d e c_a sono i coefficienti di spinta idrodinamica e di attrito.

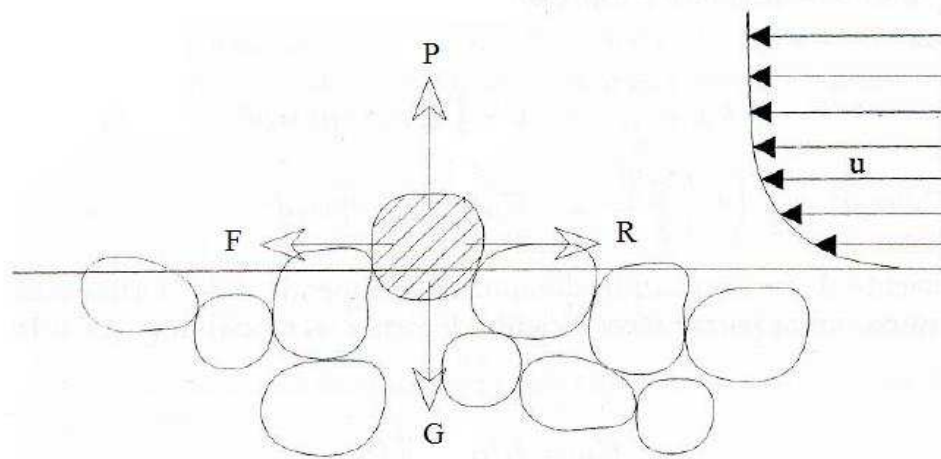


Figura 14 - Rappresentazione schematica di una particella sul fondale e delle forze a cui è sottoposta

In condizioni di incipiente movimento la componente dinamica e quella attritiva si equivalgono, quindi, ipotizzando la velocità dipendente solamente dal numero di Reynolds di attrito, si può definire il *parametro di mobilità critico di Shield* ψ_c

$$\psi_c = \frac{\tau_c}{g \cdot (\rho_s - \rho_w) d} \quad (6)$$

funzione della pendenza di fondo i , del rapporto tra la dimensione caratteristica della particella d ed il tirante idrico h e soprattutto del numero di Reynolds di attrito

$$\text{Re}^* = \frac{\sqrt{\tau/\rho_w} \cdot d}{\nu}$$

L'andamento di ψ_c in funzione del numero di Reynolds di attrito è stato studiato attraverso numerose prove sperimentali ed è riportato nella Figura 15.

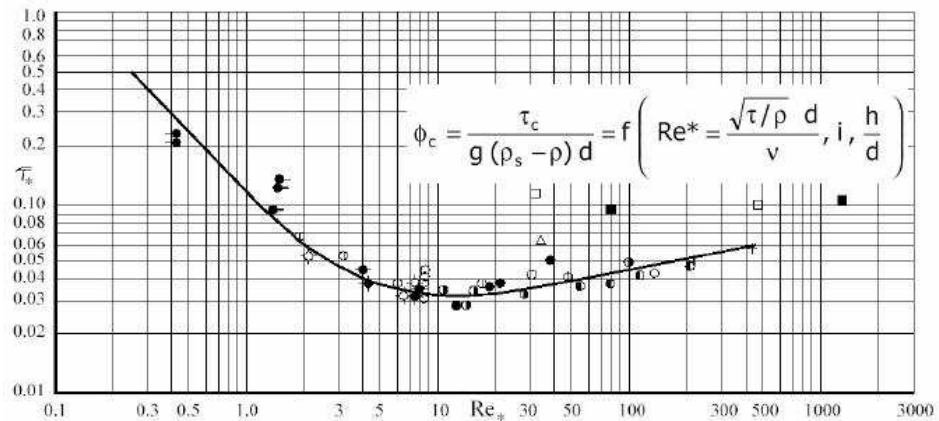


Figura 15 - Curva di Shield

Oltre ad influenzare le condizioni di trasporto della particella, le caratteristiche granulometriche del materiale determinano anche diversi comportamenti nell'interazione tra la risalita delle onde sulla battigia ed i processi erosivi.

Infatti, in condizioni di calma, quando l'onda risale una spiaggia formata da grani di grandi dimensioni, come ad esempio ghiaia o ciottoli, una parte notevole dell'acqua che è risalita ritorna percolando attraverso gli interstizi presenti tra una particella ed un'altra, pertanto il potere di trasporto della lama d'acqua nella fase discendente è minore di quello che aveva nella fase ascendente, quindi si ha deposito di materiale.

Al contrario, risalendo su un letto di materiale fine, l'acqua ha un bassissimo tasso di percolazione, quindi la fase ascendente e quella discendente hanno pressoché la stessa forza, perciò si ha uno scarso deposito di materiale.

2.2 Trasporto Solido Cross Shore

Dei meccanismi che governano il trasporto di sedimenti perpendicolarmente alla spiaggia ci si è iniziati ad occupare solamente una decina di anni fa, quindi, pur essendo a conoscenza dei fenomeni che ne condizionano il funzionamento teorico, attualmente non esistono espressioni matematiche in grado di fornire una quantificazione attendibile dei volumi in gioco, perciò un approccio quantitativo al problema può essere affrontato solamente tramite modellazione numerica o tramite successivi rilievi batimetrici da cui si possono ricavare le variazioni di volume per differenza.

Il trasporto cross shore è imputabile ad una serie di forze che vengono denominate costruttive o distruttive a seconda che portino i sedimenti verso la spiaggia o verso il mare.

Le principali forze costruttive sono [Dean et al., 2006]:

- l'attrito al fondo

$$\tau^B = \rho \frac{f}{8} |v_B| v_B \quad (7)$$

dove f è il coefficiente d'attrito di Darcy –Weisbach e v_B è la velocità al fondo;

- la corrente che si origina nello strato fluido prossimo al fondo a causa del trasferimento locale di quantità di moto associato all'attrito, che genera una tensione valutabile come

$$\tau_{BS} = -\frac{\rho \varepsilon^{0.5} \sigma^{1.5} H^2 k}{8\sqrt{2} \sinh^2(kh)} \quad (8)$$

in cui σ è la frequenza angolare d'onda, k è il numero d'onda e ε è la viscosità turbolenta.

Altri fattori invece possono assumere un carattere costruttivo o distruttivo a seconda delle condizioni: il frangimento delle onde e la turbolenza producono infatti una sospensione intermittente di sedimenti che, a seconda della direzione prevalente delle forze in gioco, possono essere indirizzati verso riva o verso il mare.

Nel 1973 Dean notò che se il tempo di caduta di una particella, inversamente proporzionale alla velocità di sedimentazione w , è inferiore alla metà del periodo d'onda, allora la particella sarà trasportata verso riva, altrimenti si sposterà verso il mare [Dean et al., 2006].

Il trasporto di sedimenti verso riva avviene in condizioni ed in tempi molto diversi da quelli che caratterizzano il trasporto verso il mare, poiché il primo si ha durante i periodi prolungati di moderata attività ondosa, mentre il secondo si manifesta durante le mareggiate.

Il trasporto verso il mare, a causa della sua attività limitata nel tempo e legata a fattori più facilmente identificabili, è il più semplice da studiare, ed inoltre il suo studio riveste una maggiore importanza nelle applicazioni costiere, poiché i problemi del danno alle opere e dell'erosione costiera sono certamente quelli di maggior rilevanza.

Le forze distruttive predominanti che lo caratterizzano sono:

- la gravità, che tende a spianare le irregolarità presenti nel profilo;
- la corrente di *undertow*, dovuta sia al flusso di ritorno verso il largo della massa di acqua che viene trasportata verso riva dalle onde, sia al trasferimento di quantità di moto nella direzione di propagazione dell'onda dovuto al frangimento della stessa;
- le correnti di ritorno, o *rip current*.

L'equazione della quantità di moto di un gruppo di onde scritta per la generica direzione di propagazione i , mediata nel tempo ed integrata sulla verticale è

$$\rho h \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + U_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right) U_j + \rho g h \cdot \frac{\partial Z}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tilde{S}_{ij} + S'_{ij}) + \tau_i^B = 0 \quad (9)$$

dove Z è il livello medio del mare nel tempo, U è la velocità della corrente, τ_i^B è l'attrito sul fondo ed \tilde{S}_{ij} e S'_{ij} sono rispettivamente il *radiation stress*, cioè l'eccesso di quantità di moto dovuto all'onda, e lo *stress di Reynolds* [Zanuttigh, 2007].

Nella surf zone, insieme alla dissipazione di energia dovuta al frangimento delle onde, si ha anche un rilascio di quantità di moto che nel caso di onde incidenti perpendicolarmente alla spiaggia induce un innalzamento del livello medio del mare, noto come *set up*.

Un semplice modello [Zanuttigh, 2007], basato sulle ipotesi di:

- assenza di dissipazione di energia al largo della linea dei frangenti;
- indice di frangimento $\gamma_b = H/h$ costante nella surf zone; γ_b è un parametro che definisce la massima altezza che un'onda può raggiungere senza frangere, in relazione alla profondità del fondale;

- validità della teoria lineare delle onde;
- condizione di acque basse nella zona di frangimento, quindi $c_g \approx c$

consente di scrivere il radiation stress come somma di un primo termine isotropo dovuto alla pressione d'onda e di un secondo dato dal flusso di energia nella direzione di propagazione

$$\tilde{S}_{ij} \cong \frac{E}{2} \left[\left(2 \frac{c_g}{c} - 1 \right) \delta_{ij} + 2 \frac{c_g}{c} \cdot l_i l_j \right] \quad (10)$$

e di assegnargli il valore di

- $\tilde{S}_{xx} = \frac{3}{2} E$ nella direzione di propagazione dell'onda;
- $\tilde{S}_{xy} = \frac{1}{2} E$ nella direzione trasversale al moto.

Imponendo quindi le ulteriori ipotesi semplificative di:

- velocità media della corrente nulla, derivante dalla teoria lineare;
- trascurabilità dell'attrito al fondo;
- onde di piccola ampiezza;

nella surf zone, valutando l'energia tramite l'altezza d'onda $H_{rms} \approx H_s / \sqrt{2}$, da cui $E = \frac{\rho g H_b^2}{8}$, il bilancio della quantità di moto in direzione perpendicolare

alla spiaggia si può scrivere come

$$\rho g h \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\rho g H_b^2}{8} = 0 \quad (11)$$

la cui distribuzione verticale in acque basse per onde lineari è rappresentata in Figura 16.

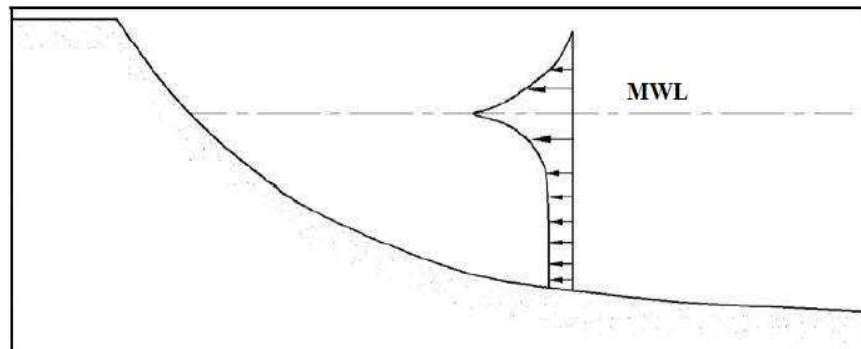


Figura 16 - Distribuzione della quantità di moto sulla verticale nella direzione di propagazione dell'onda.

Integrando l'equazione 10 su tutta la surf zone, si ottiene una relazione che lega la quota del mare a riva con quella alla linea dei frangenti:

$$Z - Z_b = \frac{3}{8} \gamma_b^2 \cdot (h_b - h) \quad (12)$$

Come si vede il massimo sovrizzo si ha a riva dove $h=0$, e, per spiagge a debole pendenza e considerando un indice di frangimento di 0.6, assume un valore pari a circa l'8% del fondale alla breaker line.

Questo valore deve essere incrementato dell'1 - 2% per tenere conto dell'attrito con il fondale [Zanuttigh, 2007].

Questo rialzo della quota della superficie media del mare genera un gradiente di pressione che va a bilanciare la diminuzione del radiation stress che segue al frangimento, tuttavia la distribuzione lungo la verticale delle due componenti non è uguale, perciò si devono necessariamente creare delle tensioni su piani orizzontali per mantenere localmente il bilancio.

Come già visto nell'equazione 10, il radiation stress è composto da due termini: il primo, isotropo e dovuto alla pressione, si concentra sulla superficie libera, mentre il secondo, legato alla quantità di moto, in acque basse ha un andamento lineare con la profondità; il set up invece induce una distribuzione di tensioni di segno opposto, anch'essa legata linearmente alla profondità del fondale.

Spostandosi lungo la colonna d'acqua verso il fondo, la tensione verso riva è progressivamente bilanciata dalla pressione dovuta al set up, pertanto si crea una distribuzione di tensione che produce una corrente diretta verso riva la cui intensità decresce all'allontanarsi dalla superficie libera.

Questa corrente, a cui si aggiungono il trasporto dell'onda e del roller, deve essere bilanciata da un'altra diretta verso il largo, detta corrente di *undertow*, che nella surf zone scorre sul fondo e produce la distribuzione di velocità riportata in Figura 17.

Per onde lineari, la portata media verso il largo dovuta al ritorno della massa d'acqua che è stata trasportata verso riva dalle onde è

$$Q = \frac{E}{\rho c} \quad (13)$$

dove E è l'energia mentre c è la celerità d'onda [Dean et al., 2006].

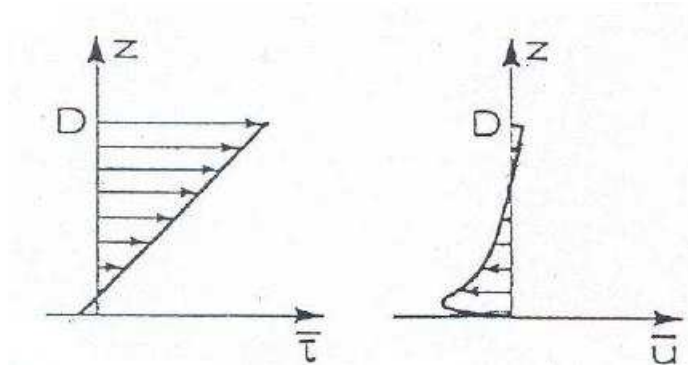


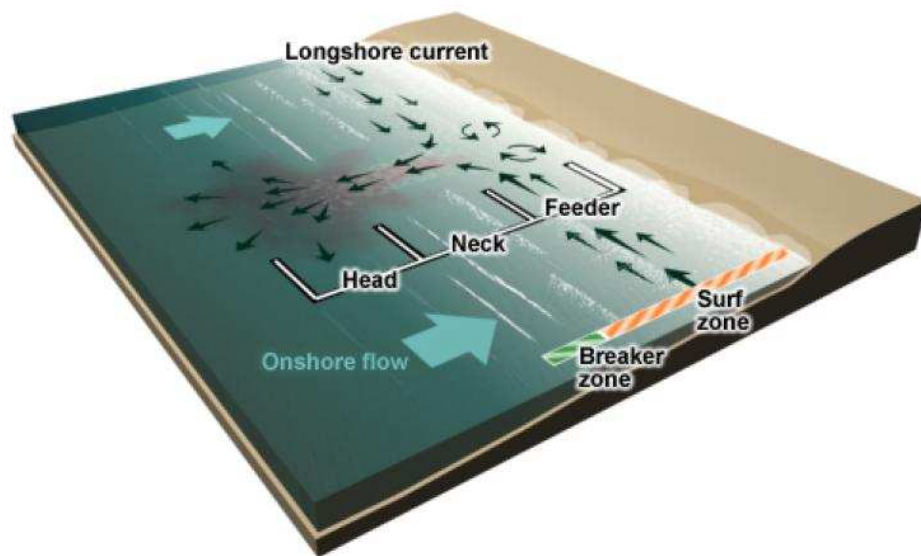
Figura 17 - Distribuzione lungo la verticale della tensione verso riva e della velocità cross shore all'interno della surf zone: si noti la corrente di undertow al fondo diretta verso il largo.

A questa corrente di fondo diretta verso il largo si aggiungono correnti superficiali impulsive della durata di circa 10 – 20 minuti dirette verso il largo, dette *rip currents* o *correnti di ritorno*.

Queste correnti possono generarsi dallo scontro di due correnti lungo riva o dall'interazione delle stesse con opere trasversali, nonché dal ritorno dell'acqua verso il largo attraverso canali presenti nella barre di fondo, e sono facilmente identificabili a causa della torbidità e della turbolenza dell'acqua.

Una corrente di ritorno è formata da tre zone (Figura 18) dette:

1. zona alimentatrice (feeder), costituita dalla zona interessata dalle correnti lungo la riva che generano la rip current;
2. collo (neck), formato dalla corrente vera e propria che si dirige verso il largo;
3. testa (head), costituita dall'allargamento e dall'arrestarsi della corrente una volta superata la linea di frangimento.



©The COMET Program

Figura 18 - Struttura di una rip current

Generalmente le rip current si formano in celle ravvicinate tra loro ed hanno velocità medie di 0.3 – 0.6 m/s, ma la presenza di strutture artificiali può dare vita a singole celle isolate in cui l'acqua si può muovere anche fino a 2.5 m/s, acquistando un grande potere erosivo e costituendo una fonte di pericolo per la balneazione.

La formazione e le caratteristiche delle correnti di ritorno dipendono essenzialmente dall'angolo di incidenza delle onde, dalla presenza di strutture naturali o artificiali perpendicolari alla costa e dalla pendenza della spiaggia.

In una spiaggia rettilinea le rip current hanno la maggior probabilità di formarsi quando le onde incidono sul litorale con una direzione prossima alla perpendicolare alla linea di riva, situazione che come si è visto genera anche la corrente di undertow, anche se alcuni studi suggeriscono che l'angolo di incidenza ideale per la formazione di tali correnti sia di circa 20° rispetto alla normale [Zanuttigh, 2007].

Questa condizione viene sostanzialmente modificata dalla presenza di strutture trasversali alla costa, poiché queste intercettano la corrente lungo riva che, come si vedrà in seguito, aumenta la sua velocità avvicinandosi ai 45° e che quindi, una volta deviata, genera rip currents più potenti.

La pendenza della spiaggia invece influenza anche la forma e le dimensioni del "fungo" che si genera, infatti su coste a debole pendenza la surf zone è più estesa e quindi la rip current presenta una zona di collo molto allungata ed una

testa allargata a causa della grande quantità di acqua che riesce a spostarsi verso riva grazie all'estensione della surf zone, mentre in spiagge ripide si formano correnti più piccole e meno intense, come si può vedere nella Figura 19 [Zanuttigh, 2007].

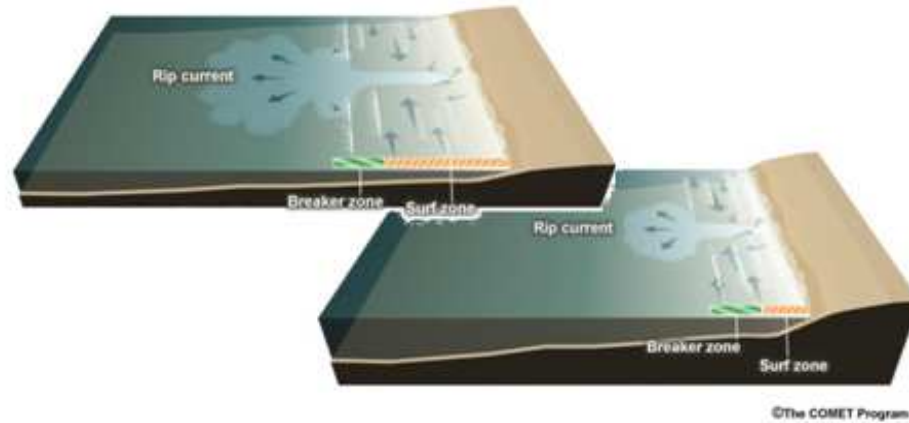


Figura 19 - Effetto della pendenza della spiaggia sulle dimensioni della rip current

Le correnti di fondo e quelle di ritorno costituiscono quindi il meccanismo principale con cui i sedimenti movimentati dal frangimento delle onde possono essere intercettati e trasportati al largo, a cui si aggiungono le erosioni provocate dalla correnti di marea ed i crolli sottomarini in spiagge a forte pendenza.

2.3 Trasporto Solido Long Shore

Il trasporto solido lungo riva è l'aspetto meglio studiato di tutto il fenomeno, per il quale si sono riuscite a dare indicazioni sperimentali circa l'entità del volume di materiale trasportato.

Pur rimanendo nel campo generale delle cause che provocano il trasporto solido, la componente lungo la spiaggia è principalmente dovuta alle correnti che si generano quando le onde incidono obliquamente sul litorale (fig. 1.8), nonché a quelle che si creano a causa del gradiente di altezza delle onde ed alle correnti di marea.

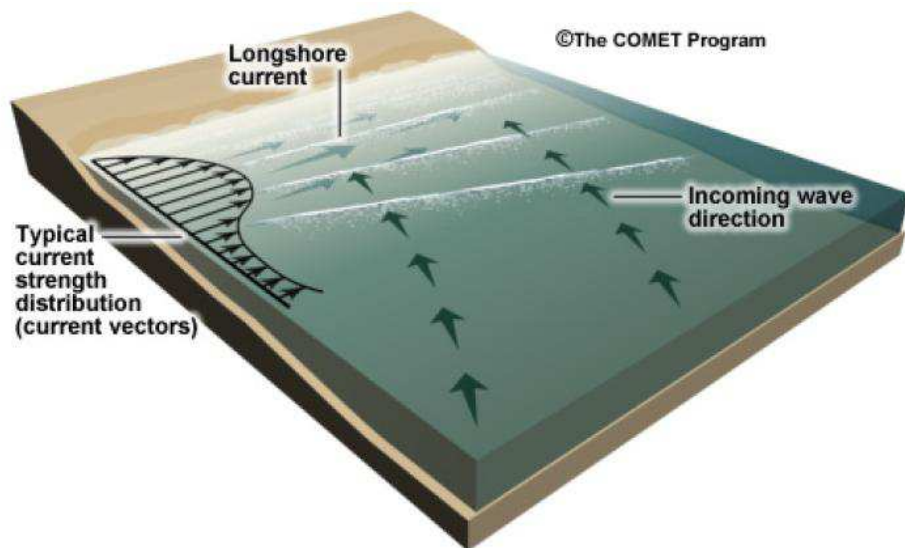


Figura 20 - Corrente lungo riva indotta da onde incidenti obliquamente

Mentre nel paragrafo precedente si è visto come nel caso di onde incidenti perpendicolarmente la perdita di quantità di moto venisse bilanciata dall'innalzamento del livello marino, all'aumentare dell'angolo di incidenza cresce sempre di più la componente long shore del radiation stress, che non può essere bilanciata dal set up.

L'analisi condotta nel 1970 da Longuet e Higgins considera un moto ondoso stazionario ed uniforme che incide con un angolo β su una spiaggia uniforme, per il quale, ricordando l'equazione 10 si può scrivere che il radiation stress nella direzione verso riva vale

$$\tilde{S}_{xx} \cong \frac{E}{2} \left[\left(2 \frac{c_g}{c} - 1 \right) + 2 \frac{c_g}{c} \cdot \cos^2 \beta \right] \quad (14)$$

ed è generato sia dal termine isotropo che dalla componente di quantità di moto correlata al set up, mentre lungo riva è presente solamente la componente anisotropa legata alla quantità di moto, perciò si scrive

$$\tilde{S}_{xy} \cong E \frac{c_g}{c} \cdot \cos \beta \sin \beta \quad (15)$$

Nella direzione lungo riva l'equazione del moto (9) si riduce dunque alla sola presenza della componente del radiation stress parallela la costa, allo scambio di quantità di moto all'interno della colonna d'acqua e dell'attrito con il fondo, e si può scrivere come

$$\frac{\partial \tilde{S}_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_e \rho h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \tau_y^x = 0 \quad (16)$$

dove V è la componente della corrente lungo riva e ν_e è il coefficiente di diffusione turbolenta [Zanuttigh, 2007].

Sotto le ipotesi di:

- piccoli valori di β ;
- condizione di acque basse;
- legge di resistenza al fondo quadratica;
- pendenza costante α della spiaggia;

allora le componenti non nulle dell'equazione del moto lungo riva danno luogo ad una soluzione in cui la velocità della corrente $V', V'' = V/V_o$, adimensionalizzata con V_o velocità teorica della corrente al frangimento in caso di assenza di diffusione turbolenta, è funzione dell'ascissa adimensionale $X = h/h_b$ tramite i parametri P_1, P_2 ed A .

Tale soluzione è data da due equazioni, la prima delle quali esprime la velocità adimensionale della corrente all'interno della surf zone, quindi per $0 \leq X \leq 1$, mentre la seconda vale all'esterno della breaker line, cioè per $X \geq 1$.

$$V' = A \cdot \left(X + \frac{P_2 - 1}{P_1 - P_2} X^{P_1} \right) \quad (17)$$

$$V'' = A \cdot \left(\frac{P_2 - 1}{P_1 - P_2} X^{P_2} \right) \quad (18)$$

E' interessante notare come in realtà nella soluzione sia presente un solo parametro $P = \frac{2\pi \cdot Ntg \alpha'}{\gamma \cdot f}$ dipendente dalla velocità orbitale delle particelle N ,

dalla pendenza della tavola d'acqua corretta dal set up α' , tramite cui si ottengono gli altri parametri [Zanuttigh, 2007].

Il fatto che vi sia una corrente anche all'esterno della surf zone è dovuto alla presenza della diffusione turbolenta, poiché questa trasferisce quantità di moto anche dove teoricamente non ci dovrebbe essere; questo comportamento risulta evidente ponendo pari a zero il valore del coefficiente di diffusione turbolenta, condizione che dà luogo ad una soluzione per $P=0$ in cui la velocità della corrente lungo riva cresce proporzionalmente al fondale dalla linea di riva, per

presentare poi una brusca discontinuità che ne annulla il valore in corrispondenza della linea dei frangenti (Figura 21).

Nella realtà è però presente la diffusione turbolenta, perciò onde che incidono obliquamente sulla spiaggia generano correnti lungo riva che si estendono per tutta la surf zone e che, una volta raggiunta la massima intensità, decrescono allontanandosi verso il largo.

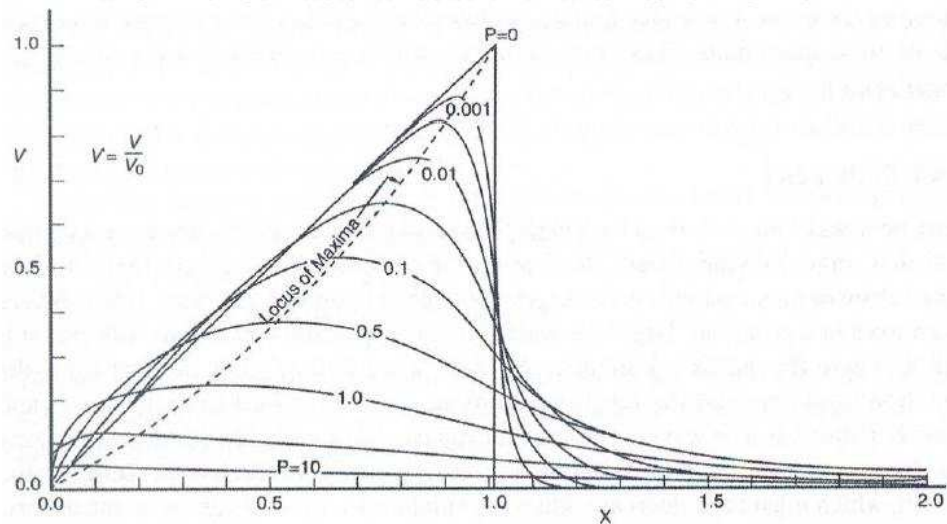


Figura 21 - Andamento della velocità adimensionale della corrente V/V_0 in funzione della distanza da riva e del parametro P

Due importanti parametri che influenzano l'intensità delle correnti long shore sono la larghezza d'onda e l'inclinazione: più un'onda è larga più la corrente indotta è veloce, mentre l'inclinazione che massimizza l'intensità è a 45° rispetto alla perpendicolare alle batimetriche.

Determinata l'intensità della corrente lungo riva, diventa importante analizzare le varie relazioni proposte per quantificare il trasporto in volume di sedimenti, aspetto sicuramente più interessante dal punto di vista ingegneristico.

Poiché il trasporto lungo riva è oggetto di studi da alcuni decenni, esistono diversi approcci tramite i quali si perviene alle varie formule che sono state proposte negli anni.

Seguendo il modello di Longuet – Higgins descritto in precedenza, Walton ha proposto un metodo di calcolo basato sulla corrente lungo riva indotta dal frangimento delle onde, in cui il trasporto solido potenziale viene espresso come

$$P_{ls} = \frac{\rho g H_b W C_f V_l}{\frac{5\pi}{2} \cdot V'} \quad (19)$$

dove W è la larghezza della surf zone, V_l è la velocità della corrente misurata in un punto, C_f è il coefficiente di attrito sul fondo funzione del numero di Reynolds e della scabrezza e V' deriva dall'equazione 17 [Rosati et al., 2002]. P_{ls} è stato introdotto come trasporto solido potenziale, infatti rappresenta la quantità di sedimento che sarebbe trasportata se ci fosse un'alimentazione continua ed infinita di materiale, ma in realtà per ottenere il trasporto effettivo in peso immerso I_{ls} si deve ricorrere ad un coefficiente di proporzionalità, scrivendo:

$$I_{ls} = K \cdot P_{ls} \quad (20)$$

Una diversa filosofia ricerca invece il trasporto potenziale secondo il metodo del flusso di energia, in cui il trasporto solido potenziale è legato alla componente lungo riva del flusso di energia ondosa come

$$P_{ls} = \tilde{S}_{xy} \cdot c_b \quad (21)$$

Sotto le ipotesi di onde incidenti su spiaggia rettilinea e di breaker line situata in acque basse, assumendo la celerità al frangimento c_b come indicatore della velocità della corrente e ricordando l'equazione 15, si può scrivere il potenziale come

$$P_{ls} = E \frac{c_g}{c} \cos \beta \sin \beta \cdot c_b \quad (22)$$

Ricordando che in acque basse vale $c_g = c = \sqrt{gh} = \sqrt{g \frac{H}{\gamma_b}}$ e che l'energia ondosa calcolata tramite l'altezza d'onda significativa è $E = \frac{\rho g H^3}{16}$, si arriva alla relazione che, scritta sulla linea del frangimento, è esprimibile come [Zanuttigh, 2007]:

$$P_{ls} = \frac{1}{16} \rho g^{3/2} \frac{H_b^{5/2} \sin(2\beta_b)}{\gamma_b} \quad (23)$$

Anche in questo caso, per passare dal trasporto solido potenziale a quello effettivo, si deve moltiplicare per il coefficiente K .

Nel tempo sono stati proposti vari valori di K per tentare di interpretare al meglio la relazione tra P_{ls} e I_{ls} tramite i dati sperimentali, come ad esempio lo 0.92 suggerito dallo Shore Protection Manual 1984, del quale la Figura 22 descrive l'adattabilità ai diversi set di dati di campo.

Tuttavia a tutt'oggi il valore di più comune utilizzo è quello indicato da Inman e Koman [Rosati et al., 2002], per cui la relazione

$$I_{ls} = 0.77 \cdot \left[\frac{1}{16} \rho g^{3/2} \frac{H_b^{5/2}}{\gamma_b} \frac{\sin(2\beta_b)}{2} \right] \quad (24)$$

è nota come relazione di Inman e Koman.

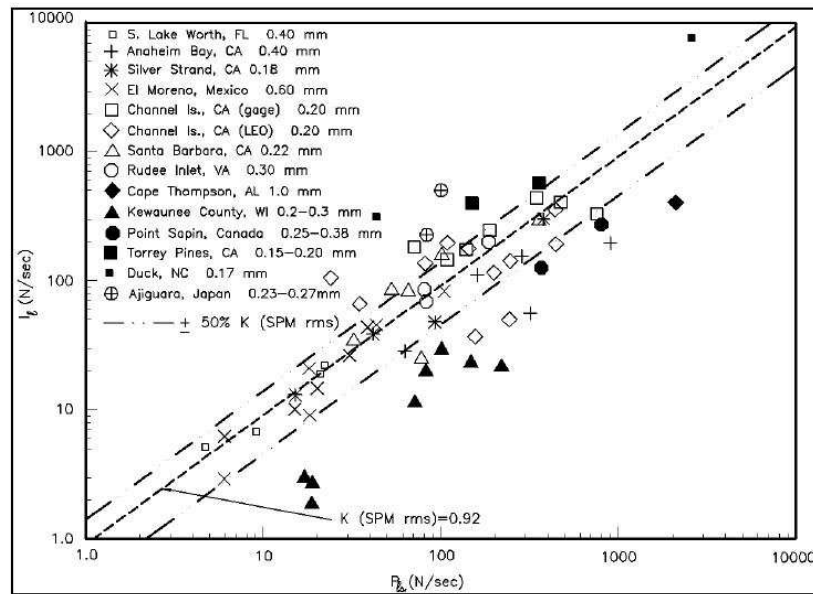


Figura 22 - Misure sperimentali di I_{ls} in funzione di P_{ls} ; la linea tratteggiata indica il valore di K fornito dal SPM '84.

In realtà il valore del parametro K non è una costante, ma dipende dalle dimensioni dei sedimenti e dalla tipologia di frangente: infatti K decresce all'aumentare del diametro dei grani, secondo quanto riportato in Figura 23, ed aumenta al crescere del parametro di Irribarren – Battjies.

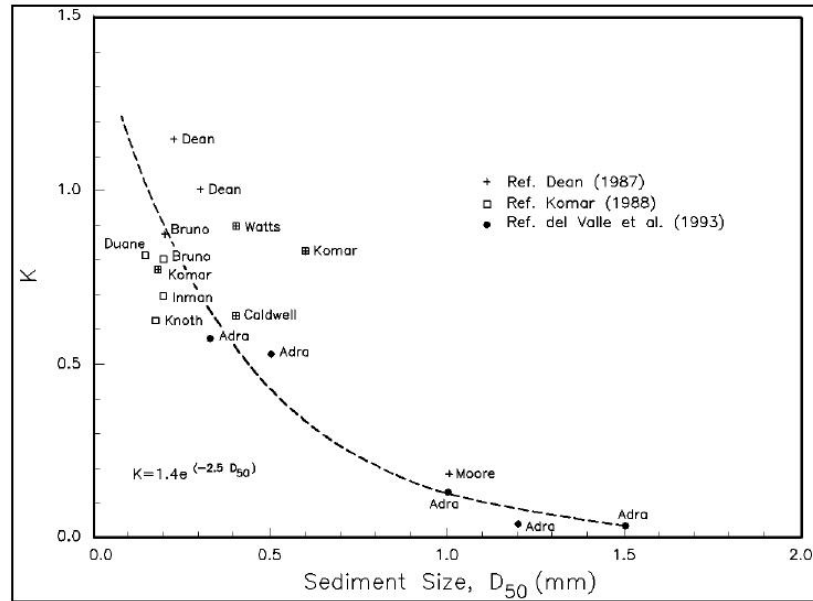


Figura 23 - Valori di K in funzione del D50.

Come si vede dall'espressione analitica, la relazione di Inman e Komar dipende fortemente dall'altezza d'onda, ma è totalmente priva di qualsiasi riferimento al diametro del sedimento ed alla pendenza della spiaggia.

Queste due variabili assumono tuttavia un ruolo importante nella definizione quantitativa del trasporto lungo riva, infatti al crescere delle dimensioni delle particelle aumenta la velocità di caduta, quindi diminuisce la capacità di trasporto, mentre al variare dell'inclinazione del litorale si ha un duplice effetto parzialmente compensativo di aumento o diminuzione dell'area interessata e di variazione di segno opposto dell'intensità del fenomeno.

Per tenere conto di questi due parametri sono state proposte diverse relazioni, tra cui quella di Van Hjulst e Pilarczyk

$$\frac{S_V}{gT_p D_{n50}^2} = 1.2 \times 10^{-3} \cdot \frac{H \sqrt{\cos \beta}}{D_{n50}} \left(\frac{H \sqrt{\cos \beta}}{D_{n50}} - 11 \right) \sin \beta \quad (25)$$

in cui il volume trasportato lungo riva S_V è funzione dell'angolo di incidenza dell'onda β , del periodo di picco dell'onda T_p , che va a sostituire la celerità al frangimento come indicatore dell'intensità della corrente, e dell'indice di mobilità del materiale, definito come

$$\frac{H \sqrt{\cos \beta}}{(\rho_s - \rho_w) \cdot D_{n50}} \quad (26)$$

da cui si vede come la relazione tenga conto delle dimensioni del materiale, ma non della pendenza di spiaggia [Zanuttigh, 2007].

La dipendenza dal periodo di picco dell'onda comporta una diversa risposta del modello ai vari tipi di onda, determinando una maggiore efficienza ai fini del trasporto solido per un frangente di tipo plunging rispetto ad uno spilling, come si vede chiaramente dalla Figura 24 in cui si riporta la concentrazione di sedimenti in sospensione dovuta a due categorie di onda differenti.

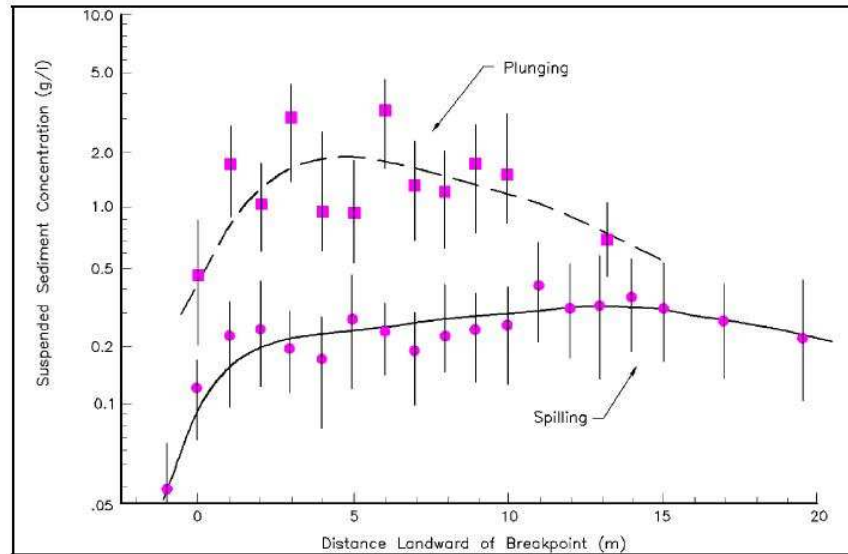


Figura 24 - Distribuzione della concentrazione media di sedimenti alla breaker line a 10 cm dal fondo per due diverse tipologie di frangenti.

Una relazione in cui compaiano entrambe le variabili è quella di Kamphuis, esprimibile come

$$\frac{I_{ls}}{\rho g \cdot \frac{H_b^3}{T_p}} = 1.3 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{H_b}{L_{op}} \right)^{-1.25} \cdot \frac{H_b}{D_{n50}} \cdot (\tan \alpha)^{0.75} \cdot \sin 2\beta_b^{0.6} \quad (27)$$

dove, in aggiunta ai già noti parametri, compare la pendenza della spiaggia α [Zanuttigh, 2007].

Questa formula è stata calibrata per coste lambite dall'oceano, comunque si nota come un aumento della dimensione dei grani del sedimento comporti una diminuzione del trasporto lungo riva, ma, poiché sedimenti più grossolani hanno un angolo di riposo maggiore rispetto a quelli fini, allora la maggior ripidità sulla quale si assesta la spiaggia comporta un aumento del trasporto long shore, determinando l'effetto parzialmente compensativo al quale si è accennato in precedenza.

La portata di sedimenti trasportata lungo riva per unità di larghezza è calcolabile tramite la relazione

$$Q_{ls} = \frac{I_{ls}}{g(\rho_s - \rho_w)(1-n)} \quad (28)$$

in cui I_{ls} è esprimibile con una delle relazioni viste in precedenza, mentre n è la porosità del sedimento valutabile in circa il 40% [Rosati et al., 2002].

Uno dei vantaggi di parlare del trasporto solido in termini di peso immerso consiste nel fatto che esso comprende gli effetti della densità del materiale, poiché il termine $(\rho_s - \rho_w)$ tiene conto della spinta verticale a cui sono sottoposte le particelle immerse nell'acqua.

2.4 Profilo di Equilibrio di un Litorale e Forme di Fondo

La turbolenza provocata dalle onde ed il trascinarsi operato dalle correnti esercitano un'azione di modellamento che agisce solamente sulla fascia di litorale denominata spiaggia attiva, che, come già detto, si estende dalla profondità di chiusura fino alla quota di risalita dell'onda.

Al di fuori di questa zona, l'andamento del fondale non risente dell'azione di modellamento indotta da onde e correnti, se non in un sottile strato superficiale al largo della profondità di chiusura.

Il profilo di spiaggia che si genera costituisce la somma sul lungo periodo del materiale asportato per erosione e di quello accumulato grazie al deposito; in una spiaggia naturale in cui le due quantità si equivalgono mediamente sul lungo periodo si crea un andamento del fondale che è detto profilo di equilibrio.

Il concetto di profilo di equilibrio di una spiaggia è stato spesso criticato, poiché in natura l'entità delle forze agenti cambia continuamente al variare delle maree, dei venti e delle condizioni marine, tuttavia l'idea di un profilo che rappresenti il perfetto equilibrio tra erosione e deposito è una solida base concettuale ed un valido strumento per definire uno schema di valutazione del trasporto solido.

Generalmente un profilo di equilibrio è caratterizzato da un andamento ascendente concavo, con pendenza crescente all'aumentare della granulometria del materiale e con i sedimenti più grossolani depositati in acque più basse rispetto a quelli più fini [Dean et al, 2006].

Per rappresentare analiticamente il profilo di equilibrio sono stati proposti diversi modelli basati sulla predominanza dell'una o dell'altra forza distruttiva,

approccio che ha portato ad una semplice espressione algebrica che fornisce il valore della profondità in funzione della distanza da riva, esprimibile come [Dean et al, 2006]:

$$h = Ax^n \quad (29)$$

Ipotizzando che le onde incidano perpendicolarmente sulla spiaggia, l'energia che si dissipa per unità di superficie è valutabile come

$$\frac{\partial(E \cdot c_g)}{\partial x} = \frac{5}{16} \gamma_b^2 \rho (gh)^{3/2} \cdot \frac{dh}{dx} \quad (30)$$

in cui l'energia ondosa viene valutata tramite l'altezza d'onda significativa al frangimento, mentre c_g è la celerità di gruppo che per acque basse è uguale alla celerità per singola onda e vale $c_g = c = \sqrt{gh}$.

Se si assume l'energia dissipata per unità di volume come forza distruttiva predominante e si suppone che rimanga costante nello spazio, allora si desume che il termine $h^{3/2}$ vari linearmente nello spazio, ed imponendo come condizione al contorno che alla battigia il tirante idrico sia nullo, ovvero che per $x = 0$ valga $h = 0$, si ottiene l'equazione del profilo di Brunn

$$h = A \cdot x^{2/3} \quad (31)$$

in cui l'unico parametro è A [Zanuttigh, 2007], legato al diametro dei sedimenti che costituiscono la spiaggia ed alla velocità di caduta di Stokes secondo una relazione empirica riportata in Figura 25.

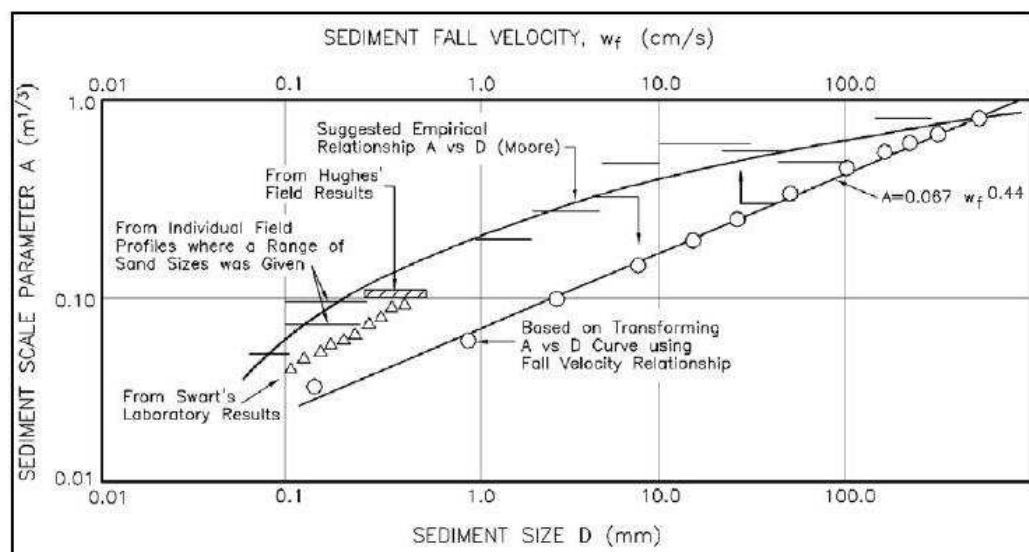


Figura 25 - Variazione del parametro A al variare del diametro del sedimento D e della velocità di caduta w

Vi sono poi relazioni che meglio interpolano i dati sperimentali relativi ad un determinato range di diametri, come ad esempio

$$A = 2.25 \cdot \left(\frac{w^2}{g} \right)^{1/3} \quad (32)$$

sviluppata da Kriebel, Kraus e Larson e valida per diametri dei grani compresi tra 0.1 e 0.4 [Dean et al., 2006].

Il valore di 2/3 dell'esponente n è stato desunto assumendo l'energia dissipata per unità di volume come principale forza distruttiva, ma il valore si riduce a 2/5 nel caso si assumano come forze distruttive predominanti l'energia dissipata per unità di superficie o uno shear stress medio lungo riva uniforme su tutta la surf zone; tuttavia, dal confronto con i dati sperimentali, si vede come il valore di 2/3 sia quello che meglio interpola i valori di campo [Dean et al., 2006].

L'equazione del profilo di Brunn, derivata da ipotesi molto semplificative, mette comunque in evidenza l'importanza che riveste la granulometria del materiale costituente la spiaggia nella definizione del profilo della spiaggia stessa.

Tuttavia risulta evidente come la morfologia del litorale non dipenda solo dalle caratteristiche del materiale, ma anche dalle condizioni ondose.

Riconoscendo alla gravità il ruolo di forza destabilizzante significativa ed adottando come modello di dissipazione dell'energia per unità di volume quello di Dally, Dean e Dalrymple

$$D = \frac{\kappa}{h^2} (F - F_s) \quad (33)$$

dove F ed F_s sono rispettivamente il flusso di energia di un'onda franta e di una stabile, si ottiene un'equazione detta profilo di Kraus

$$x = \frac{2h}{\kappa} + \left(\frac{h}{A_*} \right)^{3/2} \quad (34)$$

in cui profondità ed ascissa sono legate tramite il parametro κ , che tiene conto della ripidità dell'onda, ed un valore corretto di A [Zanuttigh, 2007].

In questo modo si può tenere conto sia dell'importanza della granulometria del materiale, che delle caratteristiche dell'onda incidente, ed inoltre si risolve il problema analitico dato dall'andamento verticale della tangente per $x=0$.

Si deve ricordare tuttavia che queste equazioni, pur rappresentando con buona approssimazione l'andamento del fondale a partire dalla linea di riva, non

possono però descrivere la grande variabilità di ciò che le onde e le correnti riescono a creare sul fondo della surf zone.

Infatti sono numerose le tipologie delle forme di fondo che caratterizzano morfologicamente il profilo della spiaggia (Figura 26), la cui nascita dipende dalle caratteristiche della corrente e dell'onda incidente, nonché dalla distanza da riva.

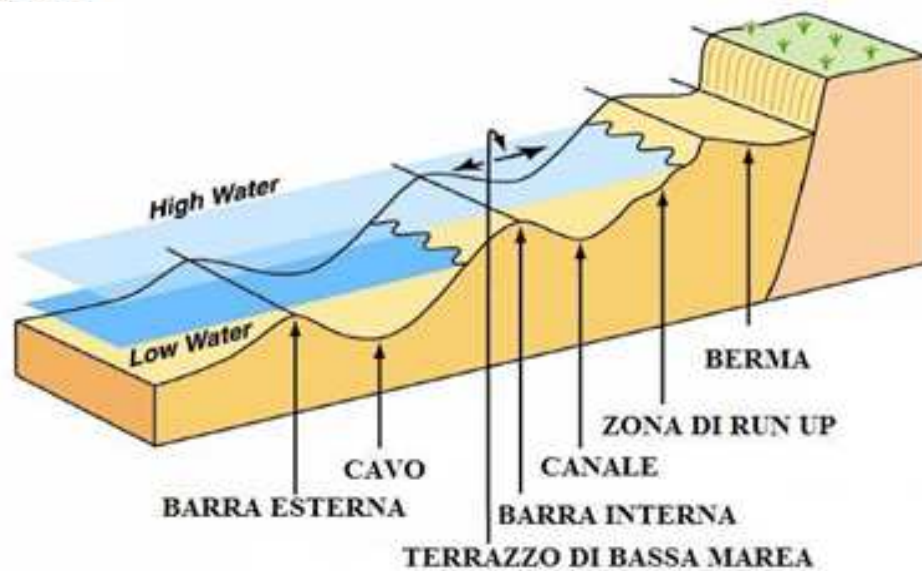


Figura 26 - Morfologia della spiaggia attiva

Al largo della surf zone, l'assenza di correnti fa sì che il fondale sia perturbato solo superficialmente, quindi si ha la formazione di strutture molto piccole come le *ripples* e le *onde di sabbia*, mentre spostandosi verso riva si ha la contemporanea presenza di onde frangenti e di correnti, combinazione in grado di generare forme di grandi dimensioni, come le barre.

Le ripples sono ondulazioni regolari del fondale, di lunghezza pari a circa la metà dell'ampiezza dell'onda che le genera e di altezza massima di 0.1 m, mentre le onde di sabbia sono strutture più importanti, comunque legate nelle dimensioni alle caratteristiche dell'onda e del fondale, come si vede in Figura 27, essendo lunghe dalle 10 alle 30 volte la profondità dell'acqua e alte circa il 10 – 20% della profondità stessa [Zanuttigh, 2007].

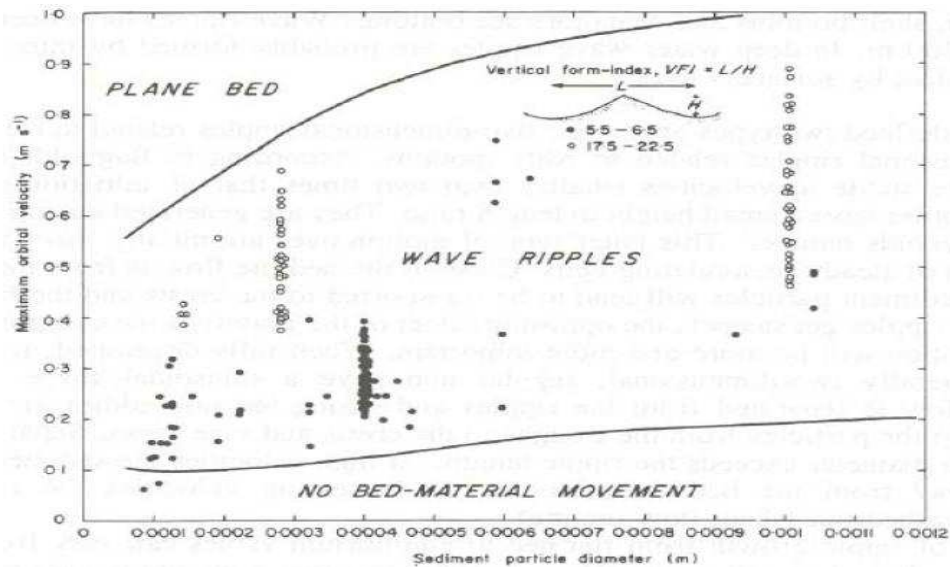


Figura 27 – Generazione di ripples ed onde di sabbia in relazione alla massima velocità orbitale delle particelle d’acqua ed alla granulometria del materiale.

Ripples ed onde di sabbia sono create dal movimento di onde che non frangono, e che quindi riescono ad alterare il fondale solamente attraverso il movimento che si propaga dalla superficie libera verso gli strati inferiori.

Tale propagazione avviene con modalità differenti a seconda del rapporto tra la profondità del fondale h e la lunghezza d’onda L , generando entro il limite delle acque intermedie un movimento delle particelle d’acqua sul fondo secondo un’orbita ellittica.

Tale orbita rimane in acque basse [$h/L < 0.05$] di ampiezza longitudinale costante e pari a quella della superficie fino al fondale, mentre nelle acque intermedie [$0.05 < h/L < 0.5$] si riduce progressivamente avvicinandosi al fondo [Zanuttigh, 2007].

Al contrario la barra è prodotta dall’azione combinata di onde e correnti, perciò si presenta come una struttura di grandi dimensioni che si sviluppa parallelamente alla costa, struttura che può essere singola o multipla e che può avere carattere permanente o stagionale.

La stagionalità delle barre dipende dal fatto che esse sono un tipico prodotto della variazione del profilo di spiaggia dovuto alle mareggiate, eventi durante i quali il materiale viene eroso in battigia, trasportato verso il largo ed infine depositato come illustrato nella Figura 28.

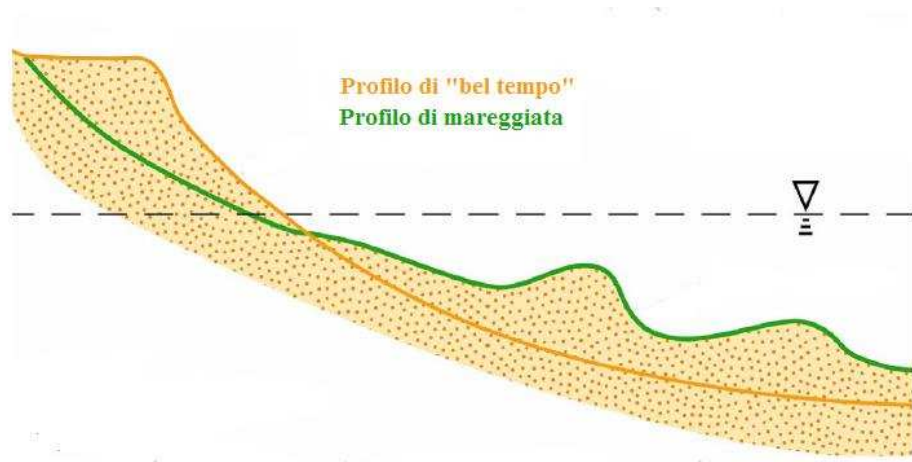


Figura 28 - Variazione del profilo di spiaggia a seguito di una mareggiata

Sebbene non vi siano ancora equazioni consolidate atte a prevedere la formazione di barre, alcune osservazioni sperimentali hanno portato alla relazione

$$\frac{H_o}{L_o} \leq 0.00027 \cdot \left(\frac{H_o}{wT} \right)^3 \quad (35)$$

dove, secondo l'abituale notazione, H_o ed L_o sono l'altezza e la lunghezza d'onda significativa al largo, T è il periodo e w è la velocità di caduta del sedimento [Dean et al., 2006].

Per onde regolari, Larson e Kraus hanno derivato le seguenti relazioni sperimentali che descrivono la geometria della barra [Zanuttigh, 2007], definendo:

$$\frac{h_{CR}}{H_b} = 0.66 \quad (36)$$

$$\frac{h_T}{h_{CR}} = 2.50 \cdot \left(\frac{H_o}{L_o} \right)^{0.092} \quad (37)$$

$$Z_B = h_D - h_{CR} = 0.122 \cdot \left(\frac{H_o}{wT} \right)^{0.59} \left(\frac{H_o}{L_o} \right)^{0.73} \quad (38)$$

L'equazione (36) definisce la sommersenza della barra h_{CR} , la successiva la profondità del cavo che si genera a valle della barra h_T ed infine l'ultima fornisce l'altezza della barra Z_B , come riportato in Figura 29.

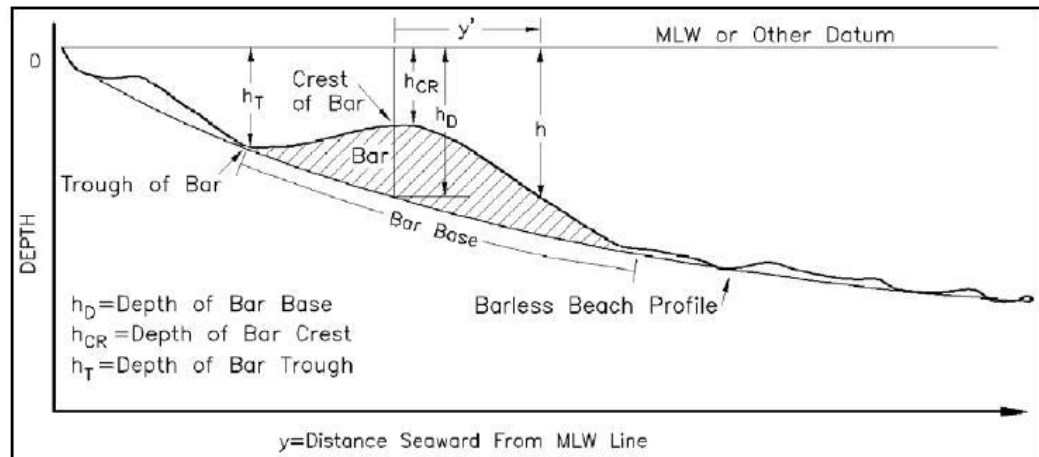


Figura 29 – Geometria della barra.

Come si vede le caratteristiche geometriche che assume la struttura dipendono dalle condizioni d'onda al largo, ovvero altezza, lunghezza d'onda e periodo, dall'altezza d'onda al frangimento, nonché dalle caratteristiche granulometriche del materiale del fondo, espresse tramite la velocità di caduta w .

La barra assume un ruolo fondamentale nel mantenimento dell'equilibrio di una spiaggia, poiché costituisce un dissipatore di energia ondosa dato che il brusco innalzamento del fondale porta le onde al frangimento molto più lontano da riva di quanto non avverrebbe in assenza di barra.

Infatti, ricordando l'espressione dell'indice di frangimento $\gamma_b = \frac{H_b}{h}$, si vede che, imponendo l'ipotesi accettabile di γ_β costante in acque basse, la diminuzione della profondità del fondale comporta una diminuzione direttamente proporzionale della massima altezza che un'onda può raggiungere senza frangere.

In realtà l'espressione dell'indice di frangimento presa in considerazione è semplificativa e non tiene conto del fatto che l'irripidimento del fondale dovuto alla barra provochi l'aumento del valore del coefficiente, ma ciò non toglie importanza al fatto che la barra induca il frangimento dell'onda, con conseguente dissipazione di energia.

Pur non essendo una forma di fondo propriamente detta, dato che si forma sulla parte emersa della spiaggia, la berma merita comunque di essere descritta in questo paragrafo, poiché la sua formazione dipende dalle condizioni del mare e dalla granulometria del materiale esattamente come per le forme di fondo.

Durante una mareggiata, come si è già visto, il profilo di una spiaggia viene drasticamente rimodellato con l'asportazione di una considerevole quantità di materiale dalla parte emersa dovuta alla maggiore altezza delle onde, che comporta una maggiore energia e quindi un più alto potere erosivo ed una maggiore lunghezza di risalita, ma durante i periodi di calma, soprattutto durante quelli estivi che sono prolungati nel tempo, le onde basse inducono deposito sulla spiaggia, dando vita ad un irripidimento del litorale ed alla berma [Dean et al., 2006].

Le caratteristiche della berma, come altezza e ripidità, dipendono dall'estensione del run up e dalla quota media del mare, nonché dalla granulometria del materiale.

I primi due fattori insieme determinano l'altezza della berma, poiché definiscono il livello massimo a cui arriva il deposito di materiale ed il livello minimo sotto il quale la sabbia è continuamente sottoposta all'azione ondosa, mentre le caratteristiche del materiale influenzano la velocità di sedimentazione, poiché un sedimento grossolano ha maggiore velocità di caduta e, come detto nel paragrafo 2.1, consente una maggiore percolazione dell'acqua risalita, togliendo energia alla fase discendente del run up. Inoltre la granulometria ed il tipo di materiale determinano la pendenza della berma, poiché questa, oltre che alle condizioni ondose, è legata all'angolo di attrito interno dei granuli.

Sulla base di dati sperimentali, Larson e Kraus hanno definito due relazioni per descrivere la geometria della berma, in cui l'altezza sopra il medio mare della berma Z_R e la pendenza della spiaggia m_* vengono espresse come [Zanuttigh, 2007]

$$\frac{Z_R}{H_o} = 1.47 \cdot \xi_o^{0.79} \quad (39)$$

$$m_* = 0.15 \cdot \left(\frac{wT}{H_b} \right)^{0.5} \quad (40)$$

in cui si vede chiaramente come l'altezza dipenda dal run up, dato che $\xi \cdot H_o$ ne è l'espressione, e come la pendenza di spiaggia sia influenzata dalla granulometria, che compare nella velocità di sedimentazione w .

2.5 Effetti delle Opere sul Trasporto Solido

Le considerazioni riportate fino ad ora valgono per le cosiddette “spiagge naturali”, ovvero per quei tratti di costa in cui vi è totale assenza di opere di difesa costiera ed in cui i processi morfodinamici indotti da onde e correnti possono attuarsi senza ostacoli.

Tuttavia, allo stato attuale, le spiagge naturali sono sempre più rare, soprattutto nelle zone in cui la costa è sottoposta ad una forte pressione antropica, come ad esempio la riviera Romagnola.

Infatti per una serie concomitante di fattori, quali:

- la drastica diminuzione dell’apporto solido fluviale, dovuto alle opere di regimazione e sbarramento dei corsi d’acqua;
- l’elevato tasso di abbassamento del suolo, comprendente sia una quota naturale sia una ben più rilevante componente antropica causata dall’emungimento di fluidi sotterranei, quali acque di falda ed acque metanifere;
- i processi di lungo periodo come l’innalzamento del livello marino;

le spiagge Romagnole sono interessate da molto tempo da importanti fenomeni erosivi, situazione che ha portato alla costruzione lungo tutta la costa di numerose opere di difesa [ARPA, 2002].

Tali opere però interferiscono pesantemente con il trasporto solido, non solo dove sono realizzate, ma anche in una zona ben più ampia rispetto a quella in cui sono presenti. Essenzialmente si possono dividere in due categorie:

1. opere che interferiscono con il trasporto long shore, come i pennelli e i moli portuali, denominate opere trasversali;
2. opere che interferiscono con il trasporto cross shore, come le barriere emerse, sommerse o a cresta bassa, dette opere parallele.

2.5.1 Opere trasversali

I pennelli trasversali sono opere rigide disposte perpendicolarmente alla spiaggia e ad essa ancorate, realizzate con diversi materiali, come ad esempio massi, cemento armato, palancole o pali di legno.

Questa tipologia di difesa è stata ed è ampiamente utilizzata nella stabilizzazione di tratti di litorale in cui è forte l’intensità del trasporto solido

lungo riva, poiché l'effetto dei pennelli è quello di interrompere in parte o totalmente la deriva dei sedimenti, a seconda della lunghezza dell'opera stessa e del materiale di cui sono sostituiti.

Infatti, assumendo per semplicità che il trasporto avvenga fino all'ascissa x_c corrispondente alla profondità di chiusura h_c , allora tanto più la lunghezza del pennello si avvicina ad x_c , tanto più è efficace nell'intercettare il materiale in movimento.

Tuttavia, oltre ad un certo limite l'incremento dell'efficacia si riduce notevolmente in rapporto a quello dei costi di costruzione, perciò la lunghezza dei pennelli è solitamente inferiore ad x_c , cosa che invece non è vera per i moli, i quali, anche a causa del materiale di cui sono costituiti, interrompono completamente il trasporto solido e generano una divaricazione tra le spiagge che insistono sui due lati, come è ben visibile dalla Figura 30.

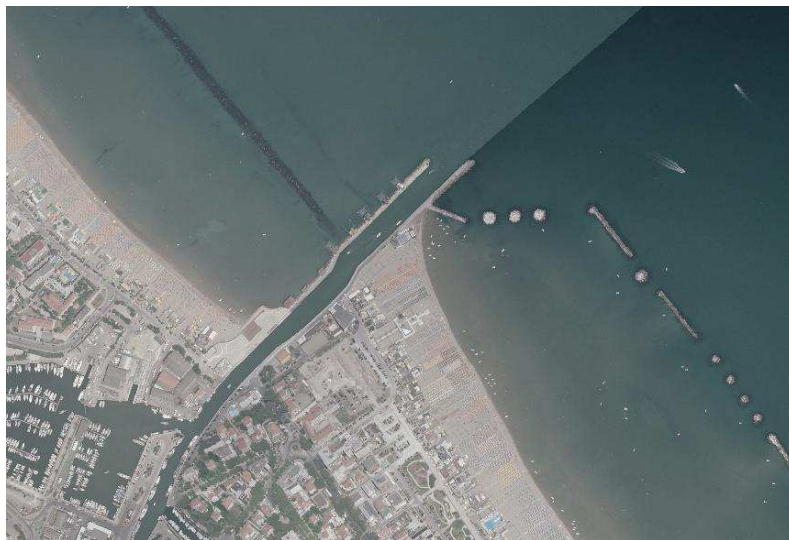


Figura 30 - Divaricazione tra la spiaggia Nord e quella Sud provocata dal molo del porto canale di Cesenatico (FC).

L'alterazione dei naturali processi morfodinamici e l'interazione delle onde con la struttura generano inoltre un andamento della linea di riva noto come "spiaggia a denti di sega" (Figura 31), poiché per effetto del gradiente dell'altezza d'onda e della riflessione si verificano deposito sopraflutto ed erosione sottoflutto, con una preponderanza del secondo termine dovuta al fatto che il deposito avviene a profondità sempre maggiori, mentre l'erosione agisce su fondali progressivamente meno profondi [Zanuttigh, 2007].



Figura 31 - Spiaggia di Misano (RN): si noti la conformazione a denti di sega che ha assunto la spiaggia a seguito della costruzione dei pennelli.

Solitamente la distanza tra due pennelli è di circa due, tre volte la lunghezza dell'opera stessa [Zanuttigh, 2007], quindi, oltre alla zona d'ombra in cui si ha erosione ed a quella di riflessione in cui si ha deposito, c'è un tratto centrale in cui la spiaggia tende a disporsi perpendicolarmente alla direzione prevalente dell'onda, ovvero a quella direzione di provenienza traccia del piano in cui il trasporto solido è mediamente nullo.

Per fare fronte al problema della spiaggia a denti di sega esistono varie soluzioni progettuali, la più diffusa delle quali nei mari a bassa escursione di marea come l'Adriatico è costituita dalla realizzazione a T della testata del pennello: tale modifica ostacola il trasporto verso il largo causato dalla deviazione della corrente provocata dal pennello ed induce il deposito dei sedimenti in prossimità della T [Zanuttigh, 2007].

Fino ad ora si è visto l'effetto dei pennelli nella zona in cui sono presenti, tuttavia nello studio dell'ingegneria costiera è molto importante avere un approccio globale, pertanto si devono esaminare anche le variazioni morfologiche che queste opere inducono sui litorali adiacenti.

Pur assumendo un comportamento generalmente positivo nella protezione della zona in cui sono installati, i pennelli interrompono quasi completamente l'alimentazione verso l'area sottoflutto a quella protetta, impedendo così il reintegro del materiale eroso e determinando l'arretramento della linea di riva della spiaggia non protetta.

Questo effetto di “spostamento del problema” è comune a tutte le opere di difesa rigida e ne costituisce la principale controindicazione, insieme all’elevato impatto ambientale dovuto all’inserimento di materiali lapidei in un contesto di spiaggia sabbiosa, che ne stravolge completamente l’assetto.

2.5.2 Opere parallele

Nella categoria delle opere parallele ricadono tutte quelle strutture disposte longitudinalmente rispetto alla costa con lo scopo di ridurre l’energia ondosa, quindi tutto ciò che generalmente viene denominato barriera, sia essa emersa o sommersa.

E’ importante però notare che gli effetti che produce una struttura emersa sono notevolmente diversi da quelli indotti da una sommersa o semi emersa, poiché la prima non consente il ritorno della massa d’acqua tracimata se non attraverso i varchi e tramite una trascurabile componente di filtrazione, a differenza delle altre tipologie di barriere per le quali una parte consistente del flusso di ritorno si realizza tra la cresta dell’opera e la superficie libera.

Le scogliere emerse sono la prima tipologia di opera parallela che è stata adottata nella protezione costiera, anche grazie alla sicurezza psicologica che il “muro” fornisce nei confronti degli attacchi esterni, e perciò attualmente sono le più diffuse, anche se l’esperienza ne ha messo in luce tutti i limiti e gli effetti negativi che producono sia sulle spiagge da esse difese che su quelle attigue.

Ad esempio, in relazione alla costa Romagnola, si può affermare che tutte le scogliere parallele emerse hanno dimostrato nel breve e nel medio periodo un sicuro effetto di stabilizzazione del litorale protetto, a cui tuttavia si associano un peggioramento della qualità delle acque e dei fondali nella zona compresa tra le opere e la battigia ed erosioni sui litorali adiacenti, chiaramente visibili in Figura 32 [IDROSER, 1996].



Figura 32 - Lido delle Nazioni (FE): erosione nel litorale sottoflutto ad una serie di scogliere emerse. Per contrastare la perdita di materiale è stata costruita una scogliera radente.

Infatti nelle zone sottoflutto a quelle protette, analogamente a quanto visto per i pennelli, la capacità di trasporto dei sedimenti si conserva immutata, mentre l'alimentazione proveniente dalla zona protetta è drasticamente ridotta dalla presenza delle scogliere, che intercettano parte del trasporto long shore ed impediscono alla spiaggia protetta di cedere materiale.

Tuttavia l'effetto più marcato provocato dalle scogliere è riscontrabile all'interno della zona protetta: la dissipazione di energia indotta dalle barriere provoca sedimentazione di materiale fine a tergo delle stesse, oltre alla cattura di elementi inquinanti, mentre la diffrazione ad arco delle onde dietro ai varchi crea particolari andamenti del litorale: si generano pertanto zone poco profonde di materiale fangoso ed organico, che, emergendo durante le basse maree, deturpano l'ambiente circostante sia dal punto di vista visivo che olfattivo (Figura 33).

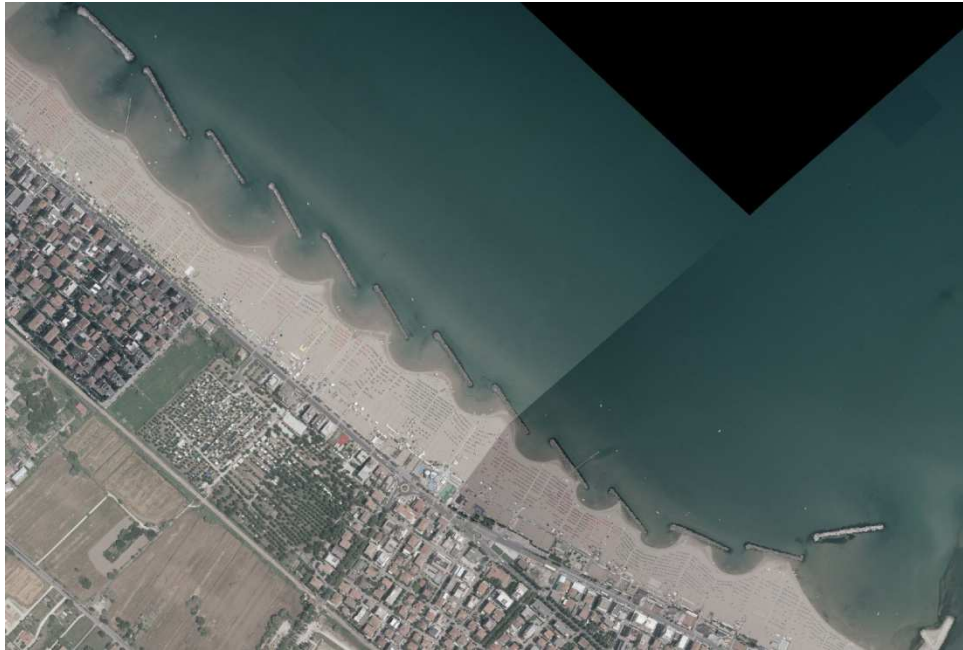


Figura 33 - Viserba (RN): tomboli a tergo delle scogliere emerse; si noti la torbidità dell'acqua dovuta alla sospensione di sedimenti fini.

A seconda delle caratteristiche geometriche dell'opera, quali la larghezza, la distanza da riva e la larghezza dei varchi, numerosi autori hanno fornito diverse relazioni empiriche atte a prevedere in fase di progetto la formazione di:

- salienti, costituiti da una cuspidata che si forma sulla battigia diretta verso la barriera;
- doppi salienti, cioè due strutture affacciate di cui una è ancorata alla riva e diretta verso la barriera, mentre l'altra si genera dietro la barriera stessa e si allunga verso la spiaggia;
- tomboli, ovvero lingue di terra che collegano la spiaggia emersa con la scogliera, costituiti dall'unione di un doppio saliente.

L'onda, impattando contro la barriera, perde gran parte della sua energia sia per effetto dell'urto sia per l'attrito che si genera nella risalita, pertanto l'onda che si genera alle spalle della scogliera dispone di una quantità di energia di molto inferiore, che tuttavia può recuperare se le si lascia a disposizione abbastanza spazio: da qui l'importanza della distanza dell'opera da riva che non deve essere tale da lasciare all'onda la possibilità di riacquistare energia.

La larghezza della scogliera B invece influisce pesantemente sul coefficiente di trasmissione $K_t = H_t/H_i$, grandezza che indica la quantità di energia che riesce

ad oltrepassare la barriera mettendo in relazione l'altezza d'onda trasmessa con quella incidente, come si può vedere dall'equazione di D'Angremond

$$K_t = -0.4 \cdot \left(\frac{R_c}{H_{si}} \right) + c \left(1 - e^{-0.5 \xi_p} \right) \left(\frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.31} \quad (41)$$

in cui oltre alla larghezza dell'opera compaiono altre caratteristiche della stessa, come l'altezza della cresta rispetto alla superficie marina R_c o il coefficiente c dipendente dalla permeabilità e dalla scabrezza, nonché parametri relativi all'onda incidente quali l'altezza significativa H_{si} e la ripidità di picco ξ_p [Zanuttigh, 2007].

Infine, a differenza dei precedenti parametri, la larghezza dei varchi non è un indicatore dell'energia che viene dispersa, ma di quella che riesce a passare tramite le aperture tra una barriera e la successiva, pertanto il valore che si assegna in fase di progetto deve tenere conto del fatto che un'eccessiva apertura riduce la protezione offerta dalle scogliere, ma anche che una larghezza esigua ostacola la circolazione idrica e quindi accentua gli effetti negativi sulla qualità dell'acqua dei quali si è parlato in precedenza.

Sino ad ora si è parlato dell'effetto delle barriere emerse sulla spiaggia, sia essa quella protetta o quella adiacente, tuttavia la presenza delle scogliere provoca correnti di forte intensità che generano erosioni localizzate sui fondali circostanti l'opera stessa e che possono destabilizzarla.

Durante le mareggiate si è visto che il profilo antistante una struttura parallela alla spiaggia è caratterizzato dalla formazione di un cavo alla base della struttura stessa (Figura 34), che si origina a causa dell'elevato gradiente nel valore del trasporto solido che si ha all'interfaccia tra l'acqua ed il materiale costituente la barriera [Dean et al., 2006].

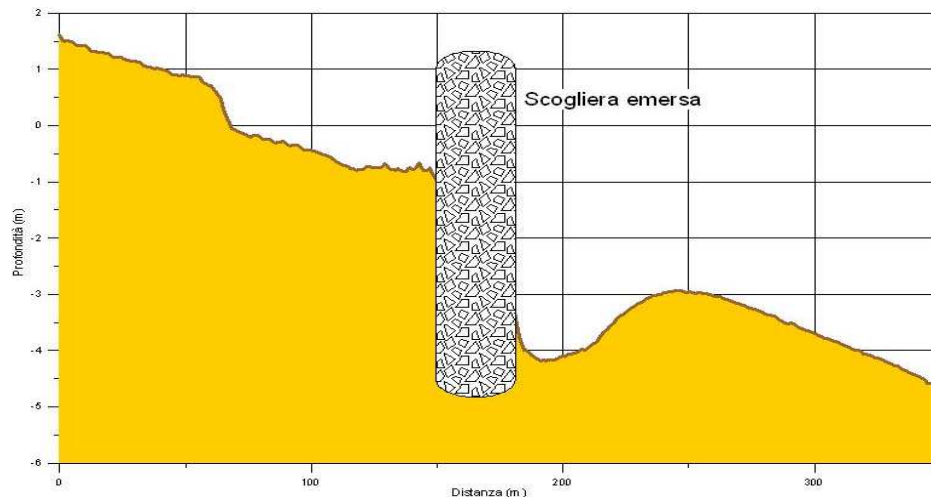


Figura 34 - Cattolica (RN): si noti il cavo che si forma nel profilo del fondale sul lato mare della scogliera.

Una spiegazione del fenomeno può essere fornita da un modello in cui un'onda stazionaria, urtando contro una parete, genera un sistema di ricircolo costituito da due celle sovrapposte, entrambe di larghezza $L/4$, con L la lunghezza d'onda incidente, delle quali la superiore è detta cella di sospensione, mentre quella inferiore è detta cella di trasporto [Zanuttigh, 2007].

A seconda della granulometria del sedimento si avrà la predominanza di una delle due celle sull'altra, situazione che crea cicli di erosione e deposito che generano un cavo al piede dell'opera sul lato mare.

Barnett e Wang hanno stimato che il volume di materiale eroso è circa il 62% di quello che il mare avrebbe asportato nella zona tra la scogliera e la riva in assenza dell'opera stessa [Dean et al., 2006]. Dato il comportamento generalmente adottato dalle scogliere emerse, si può ritenere che in zone a ridotta alimentazione naturale sia proprio questo materiale a depositarsi nella zona protetta nei primi anni di vita dell'opera, determinando l'avanzamento della spiaggia; tuttavia dopo alcuni decenni dalla costruzione, l'adattamento del fondale alla presenza dell'opera riduce la risospensione di sedimenti e conseguentemente l'alimentazione del litorale, che inizia ad arretrare nonostante la presenza delle protezioni costiere [IDROSER, 1996].

Il moto ondoso genera anche erosioni localizzate alle testate dell'opera, sia dal lato mare che da lato riva, per le quali esistono relazioni empiriche che permettono di prevederne la profondità e la larghezza.

Le buche dal lato mare sono dovute alla riflessione dell'onda contro la scogliera e le loro dimensioni si determinano in funzione delle caratteristiche della barriera, quali l'altezza della cresta R_c e la larghezza al fondo B , dell'altezza d'onda incidente e del numero di Keulegan & Carpenter KC

$$KC = \frac{U_{max} T_m}{B} \quad (42)$$

in cui U_{max} è la massima velocità orbitale al fondo, mentre T_m è il periodo medio dell'onda.

Le erosioni che si formano sul lato interno invece sono causate dalla caduta della massa d'acqua che tracima dalla cresta dell'opera, mentre le dimensioni sono ancora in relazione con l'altezza dell'onda incidente e della cresta dell'opera, ma scompare la dipendenza dalla larghezza dell'opera e dal numero di Keulegan & Carpenter, che viene sostituito dall'espressione $T\sqrt{gH}/h$ [Zanuttigh, 2007].

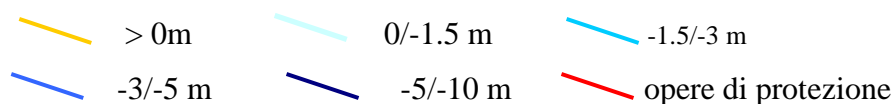
Infine, come ultimo prodotto dell'interazione tra opere emerse e trasporto solido, si deve ricordare l'erosione "lontana", ovvero quella provocata dalle correnti che interessa una fascia di fondale abbastanza ampia, che dal lato interno della barriera si estende verso il largo per diversi metri.

Queste erosioni sono generate dalle correnti che si creano alle testate delle opere per effetto del set up, di cui si è parlato nei paragrafi precedenti: l'innalzamento del livello del medio mare dovuto al rilascio di quantità di moto al momento del frangimento crea un carico idraulico tra la zona all'interno delle barriere e quella all'esterno, pertanto si generano correnti di ritorno verso il largo che sono tanto più intense quanto più ristretti sono gli spazi in cui devono passare.

Si creano quindi due diverse forme erosive (Figura 35) delle quali una è detta *a lingua di fiamma* ed è tipica di correnti che transitano nei varchi lasciati tra una scogliera ed un'altra, mentre in corrispondenza delle testate esterne dell'opera si creano erosioni *crescentiche*.



Figura 35 - Lido di Dante (RA): erosioni crescentiche e a lingua di fiamma in corrispondenza di opere di difesa costiera



Fino ad ora si è parlato di strutture emerse, ovvero la cui cresta ha un'elevazione tale da rendere rara la tracimazione, ma a causa dell'elevato impatto ambientale e degli effetti negativi che inducono sui litorali circostanti, oltre al fatto che la loro efficacia nel proteggere la spiaggia diminuisce nel tempo, questa tipologia di difesa costiera è stata sostituita nelle preferenze di amministratori e tecnici dalle opere sommerse o semiemerse, conosciute genericamente con il nome di Strutture a Cresta Bassa (LCS: Low Crested Structure).

Queste opere possono essere realizzate in sacchi pieni di sabbia, in calcestruzzo, in tubi Longard o in massi – quest'ultima tipologia è la più diffusa – ma il funzionamento generale rimane comunque invariato: il rapido innalzamento del fondale induce il frangimento delle onde incidenti, che in tal modo dissipano una grande quantità di energia e pertanto diminuiscono il loro potere di trasporto dei

sedimenti, ed inoltre crea un ostacolo che intercetta la corrente di undertow e quindi ne blocca il trasporto di materiale verso il largo.

In relazione alle problematiche analizzate per le strutture emerse, si può definire il comportamento delle LCS. Gli aspetti positivi nell'utilizzo delle scogliere sommerse in relazione a quelle emerse si possono riassumere in [IDROSER, 1996]:

- migliore qualità delle acque all'interno della zona protetta, grazie al ricambio consentito dalla maggiore circolazione idrica;
- assenza di tomboli o salienti, dovuta alla maggiore energia conservata dalle onde, che riduce il deposito di sedimenti fini, ed alla maggiore circolazione idrica, che li distribuisce su tutta l'area protetta;
- minore erosione lato mare, grazie alla minore quantità di energia riflessa dall'opera.

Per contro, come aspetti negativi si hanno [IDROSER, 1996]:

- la non eliminazione dell'erosione delle spiagge sottoflutto all'opera, poiché anche le LCS intercettano il trasporto solido long shore, quindi impediscono la naturale alimentazione della costa;
- l'aumento delle erosioni lontane: la cresta bassa permette un maggior passaggio di acqua, pertanto le correnti di ritorno hanno un'intensità maggiore, soprattutto ai varchi;
- la minor protezione della spiaggia, poiché l'energia trasmessa al di là della barriera è maggiore rispetto a quanto avviene per strutture emerse.

CAPITOLO 3

SITO DI STUDIO: CATTOLICA

Cattolica è un comune italiano di 16.622 abitanti della provincia di Rimini in Emilia-Romagna (Figura 36).

Confina ad est con Gabicce Mare (PU) dal quale è separata dal torrente Tavollo, a sud est con Gradara (PU), ad ovest con Misano Adriatico, dal quale è separata dal fiume Conca e a sud con San Giovanni in Marignano; è bagnata a nord dal Mare Adriatico (Coordinate $43^{\circ}57'30.40''N$ $12^{\circ}44'19.00''E$).



Figura 36 - Localizzazione Geografica di Cattolica

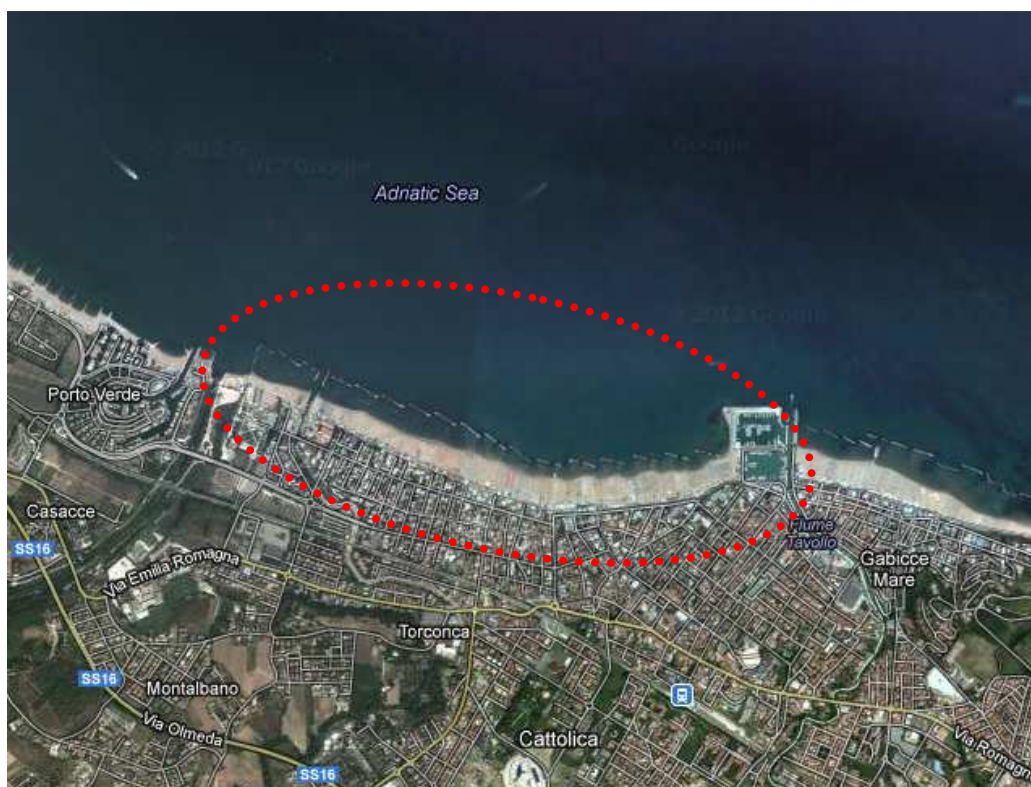


Figura 37 - Immagine satellitare di Cattolica (Google Map)

La spiaggia di Cattolica rappresenta gli ultimi 2100 m dei 130 km del litorale Emiliano-Romagnolo, e si estende dalla nuova darsena alla foce del fiume Conca (Figura 37). La spiaggia è protetta da barriere emerse parallele alla costa, e viene utilizzata esclusivamente a scopo turistico-balneare (Figura 38). In questo capitolo verrà quindi studiato il clima meteo-marino del litorale, i criteri di rilievo utilizzati e lo stato del litorale fino al 2006, che verrà poi confrontato nel capitolo successivo con i risultati relativi al 2012.



Figura 38 – Foto spiaggia di Cattolica

3.1 Clima Meteo-Marino

In corrispondenza del litorale emiliano-romagnolo una prima ricostruzione completa del clima meteo-marino è stata effettuata nell'ambito del Piano Costa 1981. I dati utilizzati furono le osservazioni effettuate sistematicamente, due volte al giorno, tra il 1971 e il 1980, da un osservatore sulla piattaforma PCB dell'AGIP, posta a 20 km al largo di Porto Corsini, su un fondale di 25 m. Tale ricostruzione del clima ha costituito il riferimento principale per tutti gli studi e i progetti di opere realizzate lungo il litorale regionale. La disponibilità di nuove serie di dati, acquisite nel corso degli anni '80, e di nuovi strumenti di elaborazione matematica, hanno portato all'aggiornamento e integrazione dello studio del clima meteomarinico nell'ambito del Piano Costa 1996. In tale sede sono state prese in considerazione i dati del KNMI olandese e quelli misurati da strumenti installati in diverse altre piattaforme AGIP, ritenuti complessivamente però meno accurati. L'analisi approfondita condotta su questi dati ha portato a scegliere di nuovo il clima ottenuto a partire dai dati della PCB, estesi fino al 1983, come il più rappresentativo del litorale regionale. Cessato il rilievo visivo delle condizioni del moto ondoso presso la PCB, non si sono però rese disponibili altre serie di dati altrettanto lunghe e complete. Gli strumenti installati dall'AGIP su varie piattaforme hanno infatti funzionato in maniera discontinua e per brevi periodi. Nel corso degli anni '90 sono così mancati i dati affidabili e rappresentativi del clima meteo-marino lungo il tratto costiero regionale. La lacuna è stata in parte colmata a partire dal 1999, facendo riferimento ai dati della boa RON (Rete Ondametrica Nazionale) di Ancona, posta a 27 km dalla costa e in corrispondenza di un fondale di circa 70 m. In considerazione della notevole diversità del clima, che si verifica frequentemente tra le varie zone del mare Adriatico, questi dati non sono però del tutto rappresentativi per il litorale in questione. Per questo motivo ARPA Ingegneria Ambientale si è fatta parte attiva presso la Regione per inserire, tra gli obiettivi del progetto europeo Beachmed-e, la messa in mare di una boa davanti alla costa emiliano-romagnola. Questo obiettivo è stato raggiunto a metà del 2007, grazie anche al contributo finanziario di ARPA, con la collocazione davanti a Cesenatico di una boa ondametrica, su un fondale di circa 10 m.

Per quanto attiene al clima verificatosi davanti al litorale emiliano-romagnolo, tra il 2000 e il 2005, quindi tra le ultime due campagne topo-batimetriche i dati disponibili sono in massima parte quelli della boa di Ancona. Oltre alla boa di Ancona si è presa in considerazione la boa di Punta della Maestra, davanti al Delta del Po, che è entrata a far parte della RON nel 2002, ma per vari motivi ha funzionato in modo discontinuo tanto che i dati disponibili utilizzabili sono solo quelli del 2004 [Preti et al 2007].

3.1.1 La Piattaforma PCB

Nel “Progetto di Piano Costa 1996” è stata affrontata l’analisi del clima meteomarinario regionale attraverso la ricostruzione del regime del moto ondoso, del livello del mare, dell’andamento dei venti e delle correnti in Adriatico.

Relativamente al regime del moto ondoso, il “Progetto di Piano Costa 1996” ha preso in esame le varie fonti informative disponibili rappresentate da:

- osservazioni dalle piattaforme di perforazione dell’AGIP tra cui la piattaforma PCB, posizionata a circa 20 km da Ravenna e già utilizzata dal primo “Piano Costa 1981” come fonte dati di riferimento per definire il clima al largo regionale;
- osservazioni raccolte dall’Istituto Meteorologico Reale Olandese (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut - KNMI);
- -osservazioni strumentali davanti al Delta del Po. Attraverso il confronto tra le varie fonti informative, lo studio del “Piano Costa 1996” ha evidenziato come i dati

rilevati presso la piattaforma PCB dal 1971 al 1983, fossero i più affidabili per definire il clima del moto ondoso al largo della costa regionale. Nella Tabella 1 si riporta, in forma tabellare, il clima medio annuo ricavato dai dati misurati alla piattaforma PCB, in termini di percentuale d’accadimento dell’altezza d’onda rispetto alla direzione di provenienza. Per quanto riguarda i dati provenienti da misure dirette in mare con boe ondometriche, la fonte informativa più aggiornata è quella relativa alla boa collocata a largo di Ancona e inserita, dal 1999, nella Rete Ondametrica Nazionale RON. Queste informazioni sono parzialmente integrabili con i dati registrati dalla boa di Punta della

Maestra, entrata a far parte della RON nel 2002 e collocata davanti al Delta del Po, ma che rappresentano una serie storica limitata e discontinua.

I dati provenienti dalle boe ondametriche non possono essere utilizzati direttamente per ricostruire il regime [Preti 2006].

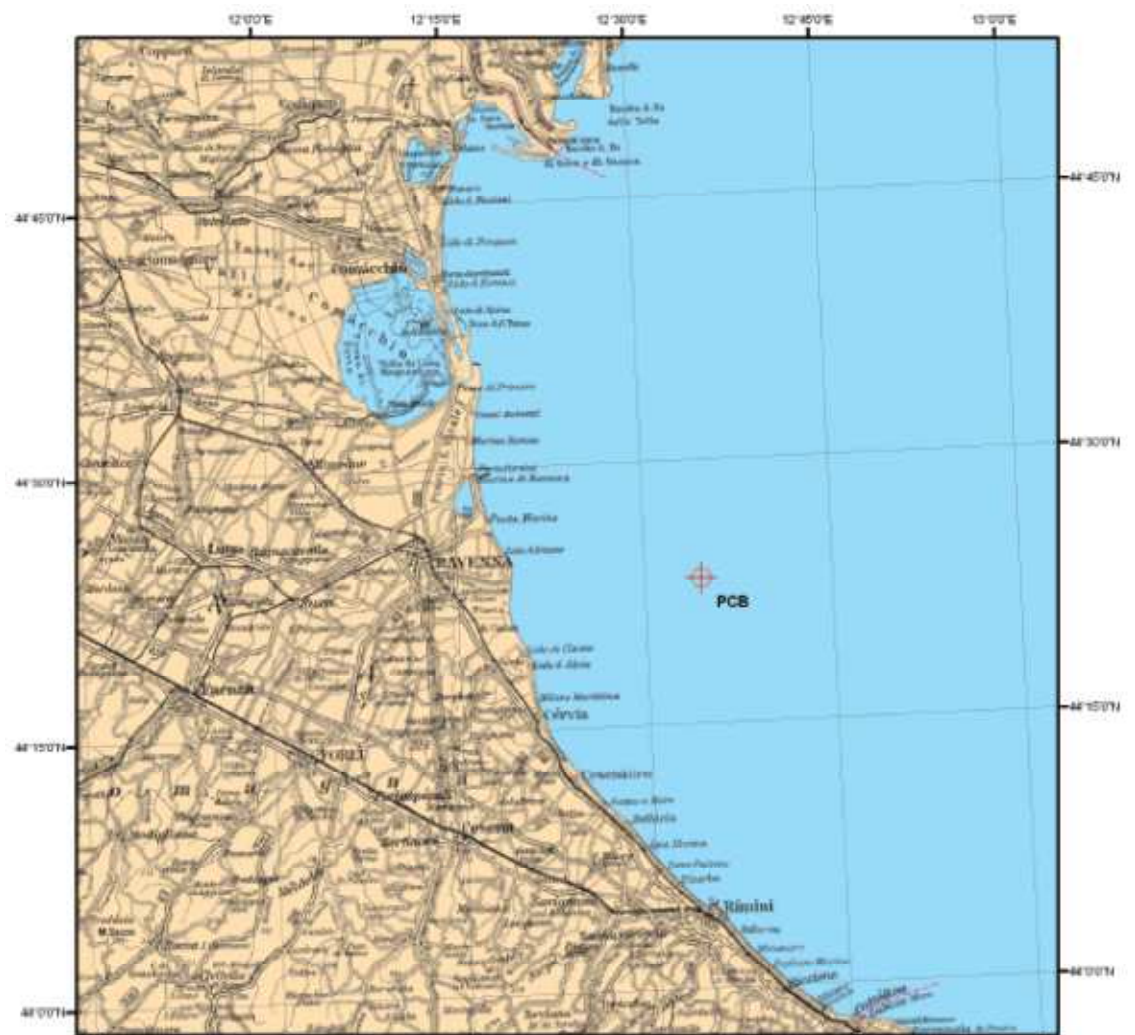


Figura 39 - Localizzazione PCB

Hs [m]/ dir [°]	calma	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	TOT%
0		1,06	1,37	0,35	0,19	0,03	0,03	-	0,01	-	-	3,04
30		1,26	1,96	0,94	0,93	0,21	0,09	0,06	0,03	0,01	0,02	5,51
60		2,29	3,05	1,39	1,23	0,29	0,18	0,08	0,03	0,01	0,03	8,58
90		5,21	5,76	2,15	1,41	0,34	0,36	0,06	0,01	0,01	0,01	15,31
120		2,48	3,38	0,95	0,63	0,11	0,10	0,02	-	-	-	7,68
150		1,42	2,31	0,47	0,29	0,02	0,02	-	-	-	-	4,54
180		0,94	1,48	0,23	0,06	-	-	-	0,01	-	-	2,73
210		1,31	1,41	0,17	0,04	0,01	-	-	-	-	-	2,93
240		3,19	2,62	0,23	0,06	0,01	0,02	-	0,01	-	-	6,15
270		8,49	6,33	0,49	0,16	0,02	0,06	0,01	0,02	0,01	-	15,60
300		4,90	4,56	0,49	0,10	0,01	0,02	-	0,01	-	-	10,08
330		3,04	3,32	0,46	0,11	0,01	0,01	-	-	-	-	6,94
TOT%	10,90	35,60	37,55	8,34	5,21	1,05	0,88	0,24	0,13	0,05	0,06	

Tabella 1 - Piattaforma PCB (1971-1983) – Clima del moto ondoso offshore ricostruito dal “Piano Costa 1996”

3.1.2 La rete onda metrica Nazionale (RON)

La Rete Ondametrica Nazionale (RON) è attiva dal luglio 1989, data in cui sono diventate operative le 8 boe direzionali di La Spezia, Alghero, Ortona, Ponza, Monopoli, Crotone, Catania e Mazara del Vallo. Nel 1999 sono state aggiunte alla rete preesistente altre due boe tra cui quella di Ancona, portando la RON a complessive dieci stazioni di misura.

Le boe direzionali utilizzate sono Datawell-Wavec e Datawell-Waverider collegate via radio ad un centro di ricezione ed elaborazione a terra dei dati.

I dati vengono acquisiti normalmente per periodi di 30 minuti ogni 3 ore e con intervalli inferiori nel caso di mareggiate particolarmente significative. Per valori di Hs superiori a 3.0 m, la boa di Ancona acquisisce infatti i dati in continuo e li produce ogni mezz'ora. L'elaborazione dei dati fornisce i seguenti risultati:

- Hs (metri), altezza d'onda significativa spettrale;
- Tp (secondi), periodo di picco;
- Tm (secondi), periodo medio;
- Dm (gradi N), direzione media di propagazione.

Vengono inoltre elaborati i seguenti parametri relativi allo spettro: la densità di energia, la dispersione direzionale (spreading), l'asimmetria (skewness) e la curtosi.

Dopo il 2002, alla rete RON sono state apportate migliorie, soprattutto per quanto riguarda l'affidabilità e l'efficienza dell'intero sistema. Il numero delle boe è stato infatti portato a 14, grazie alla messa in mare di ulteriori 4 boe direzionali, tra le quali quella di Punta della Maestra, di fronte al Delta del Po.

3.1.3 La boa di Ancona

La boa di Ancona è entrata a fare parte della RON nel marzo 1999; la boa era stata installata in precedenza dalla Regione Marche, ma i periodi di funzionamento erano stati brevi e non continuativi. Grazie ad un accordo con il Servizio Mareografico, la gestione è stata trasferita a quest'ultimo che ha provveduto ad integrarla nella rete nazionale.

Dal marzo 1999 circa a metà del 2002, la boa era collocata in corrispondenza di un fondale di 50 m e a circa 22 km dalla costa (promontorio del Monte Conero). In seguito la boa è stata collocata a circa 27 chilometri dalla costa, su un fondale di 70 m. Le coordinate geografiche della boa sono Lat. 43° 41' 5" – Long. 13° 46' 11".

Il punto in cui è collocata la boa è caratterizzato da una distribuzione del fetch geografico evidenziata nella (Figura 40) nella quale si vede che le direzioni in cui sono maggiori le lunghezze del fetch sono quella da sud-est e da nord-ovest; il settore di nord-est, anche se piuttosto "stretto" presenta lunghezze di una certa rilevanza.

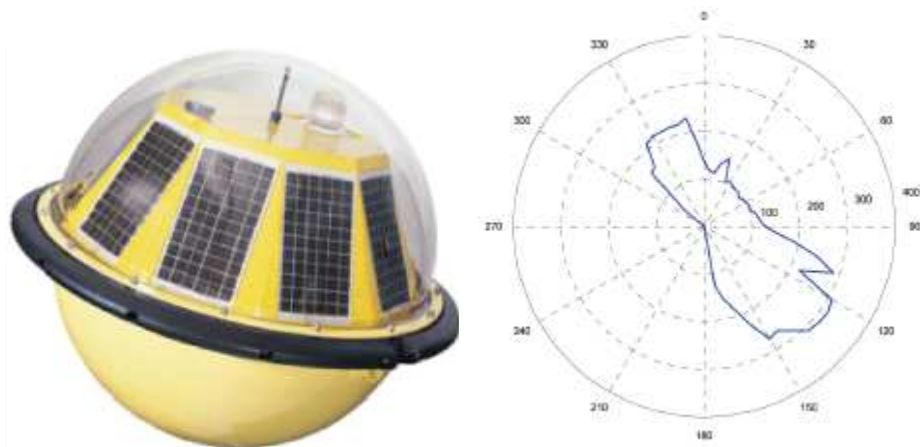


Figura 40-Boa tipo Triaxis (sinistra), fetch geografico boa onda metrica di Ancona (destra)

La tipologia dei dati raccolti è rappresentata da rilevamenti cadenzati ogni 3 ore fino a circa metà maggio 2002, successivamente le serie storiche fornite dal sito ufficiale della RON hanno una cadenza di 30 minuti.

In genere, rispetto al numero teorico di possibili rilevamenti, si è registrato un numero di registrazioni utili piuttosto buona, dell'ordine di quasi il 65% (49.365 rilievi utili a fronte di 77.698 possibilità). Anche rispetto ai singoli anni, il grado di "copertura" è piuttosto elevato, dal 60% del 2002 all'88% del 2003, con l'eccezione del 2005 durante il quale le osservazioni effettuate coprono solamente il 25% degli intervalli utili di misura.

Le elaborazioni per determinare le caratteristiche del clima medio annuo e quello medio stagionale, hanno preso come riferimento il periodo 2000-2005, durante il quale si è avuta una buona continuità temporale delle registrazioni, pur essendosi verificate, come si è visto, alcune interruzioni nei rilevamenti del 2005.

Dir (°)	Hs (m)	Hs (m)										Totale %		
		Hs < 0,25	0,25 ≤ Hs < 0,5	0,5 ≤ Hs < 1,0	1,0 ≤ Hs < 1,5	1,5 ≤ Hs < 2,0	2,0 ≤ Hs < 2,5	2,5 ≤ Hs < 3,0	3,0 ≤ Hs < 3,5	3,5 ≤ Hs < 4,0	4,0 ≤ Hs < 4,5		4,5 ≤ Hs < 5,0	Hs ≥ 5,0
0 ≤ °N < 30			2,13	3,39	1,98	0,99	0,38	0,22	0,09	0,02	0,01			9,22
30 ≤ °N < 60			1,60	3,10	1,89	1,12	0,64	0,24	0,05	0,01	0,01			8,66
60 ≤ °N < 90			1,76	2,15	0,92	0,52	0,20	0,08	0,05	0,01				5,71
90 ≤ °N < 120			2,42	3,66	1,76	0,89	0,33	0,13	0,09	0,04				9,31
120 ≤ °N < 150			4,69	4,31	1,01	0,40	0,16	0,05	0,04	0,01				10,68
150 ≤ °N < 180			2,87	2,51	0,60	0,17	0,10	0,04	0,03	0,02				6,36
180 ≤ °N < 210			1,45	1,44	0,47	0,21	0,09	0,06	0,04	0,01	0,01			3,79
210 ≤ °N < 240			1,49	1,67	0,46	0,15	0,08	0,03	0,05		0,01			3,94
240 ≤ °N < 270			1,70	1,82	0,54	0,14	0,06	0,04	0,03					4,36
270 ≤ °N < 300			2,36	2,34	1,04	0,38	0,11	0,04	0,03	0,01				6,31
300 ≤ °N < 330			3,01	3,36	1,21	0,32	0,10	0,04	0,01					8,06
330 ≤ °N < 360			2,41	2,73	1,08	0,43	0,13	0,05	0,03	0,01				6,87
Totale %		16,73	27,90	32,47	12,97	5,73	2,42	1,05	0,54	0,13	0,04	0,00	0,00	

Tabella 2 - Boa ondometrica di Ancona - Frequenza (%) dell'altezza d'onda per direzione nel periodo 2000-2005

Il clima medio annuo di Tabella 2, è rappresentativo del clima del moto ondoso osservato nell'intervallo di tempo intercorso tra la fine dei rilievi topografici della 3a campagna di rilevamento (2000) e l'inizio dei rilievi della 4a campagna (fine 2005). In ragione della disposizione geografica, i mari del III e IV Quadrante (Figura 41) non influenzano la dinamica del litorale emiliano-romagnolo. Pertanto, ai fini dell'analisi del regime e dell'assetto della costa regionale, è opportuno prendere in esame solo gli eventi che provengono

dal I e II Quadrante [Preti et al. 2007].

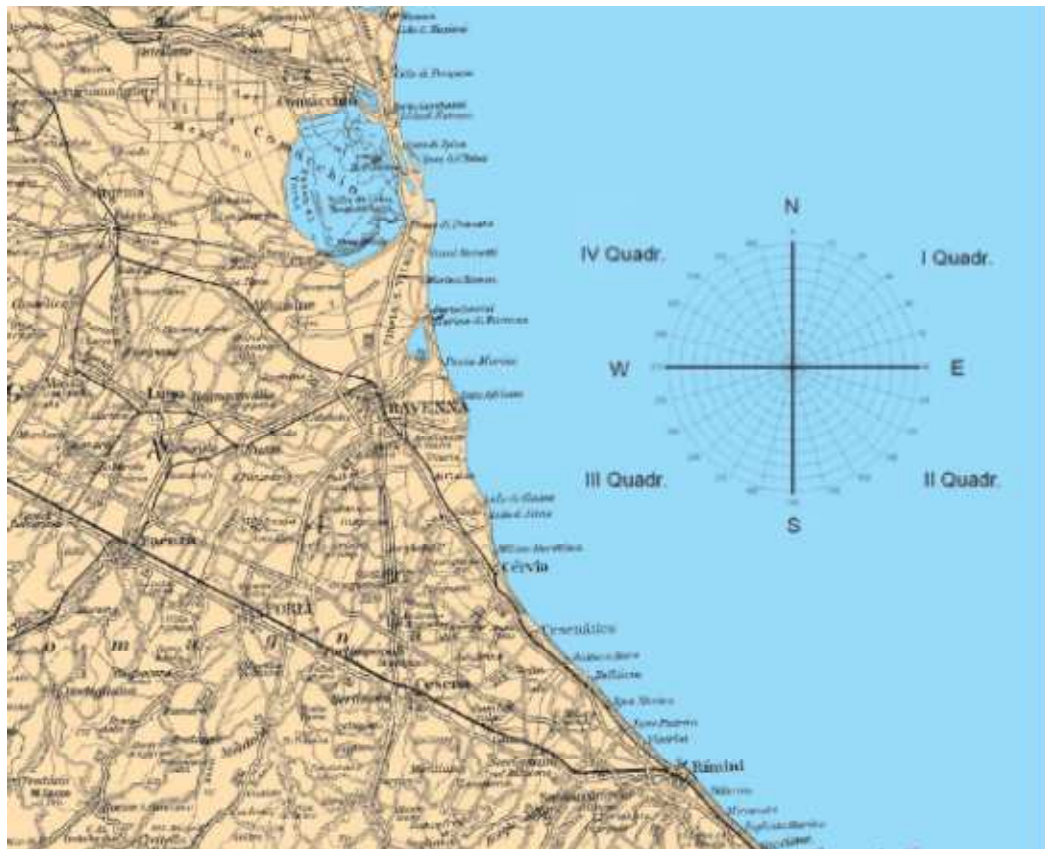


Figura 41 - In ragione della disposizione geografica, la dinamica del litorale emiliano-romagnolo dipende fondamentale dai mari del I e II

Per questa ragione in questa tesi, che si propone di analizzare dati relativi all'ultima campagna del 2012 per confrontarli con quelli del 2006, per una descrizione del clima della spiaggia di Cattolica si farà riferimento alla boa NAUSICAA di Cesenatico.

3.1.3 La Boa NAUSICAA



Figura 42 - Boa ondametria NAUSICAA al largo di Cesenatico

Da quanto riportato in precedenza il quadro sulla disponibilità di misure di moto ondoso nel bacino settentrionale del Mare Adriatico è caratterizzato, da un lato, da una relativa abbondanza di dati con una distribuzione spazio-temporale alquanto disomogenea, dall'altro, dalla totale mancanza di dati ondametrici recenti, rilevati davanti alle coste della Regione Emilia-Romagna.

L'occasione per colmare questa lacuna è stata offerta dal progetto europeo Beachmed-e, in particolare nel sottoprogetto denominato "NAUSICAA", nell'ambito del quale la Regione si è posta l'obiettivo di installare una specifica boa di misura. Per definire le modalità di attuazione dell'intervento, nel 2006 ARPA Ingegneria Ambientale ha promosso una serie di riunioni tecniche con la Regione Emilia-Romagna, con il Servizio IdroMeteorologico di ARPA e con il DISTAR dell'Università di Bologna.

Dopo aver optato per l'installazione di una boa galleggiante, in considerazione della limitatezza del finanziamento europeo, ARPA ha deciso di contribuire con propri fondi all'acquisto della stessa.

Per quanto riguarda l'individuazione del sito di installazione, sono state prese in considerazione da un lato, l'esigenza di collocarla su una profondità di circa 20m

d'acqua al fine di ottenere dati rappresentativi del reale clima indisturbato al largo, dall'altro la necessità di evitare danni e furti. Pertanto è stato scelto come sito un'area adiacente a un campo di allevamento di mitili, quindi interdetto alla navigazione e soggetto a guardiania continua. Il sito si trova a 8 km al largo di Cesenatico su un fondale di circa 10 m; il varo è avvenuto il 23 maggio 2007 e l'ancoraggio è di tipo elastico con cavo di sicurezza.

La boa ondometrica direzionale installata è una "Datawell Directional waverider MkIII 70" in grado di rilevare oscillazioni pari a ± 20 m con periodi da 1,6 a 30 secondi, e con una risoluzione di $1,5^\circ$ nell'angolo di provenienza dell'onda.

I dati vengono acquisiti ogni 30' ed archiviati nel database meteo-marino del Servizio Idro-Meteorologico di ARPA, visibili in Internet (<http://www.arpa.emr.it/sim/?mare/boa>) [Preti et al 2007].

Tramite la rielaborazione dei suddetti dati è stato possibile creare grafici polari che mettono in relazione l'altezza d'onda significativa (H_s) con la frequenza d'onda in base alla direzione di provenienza del vento. Di seguito è riportato l'andamento del moto ondoso per ogni anno, dal 2007 al 2011.

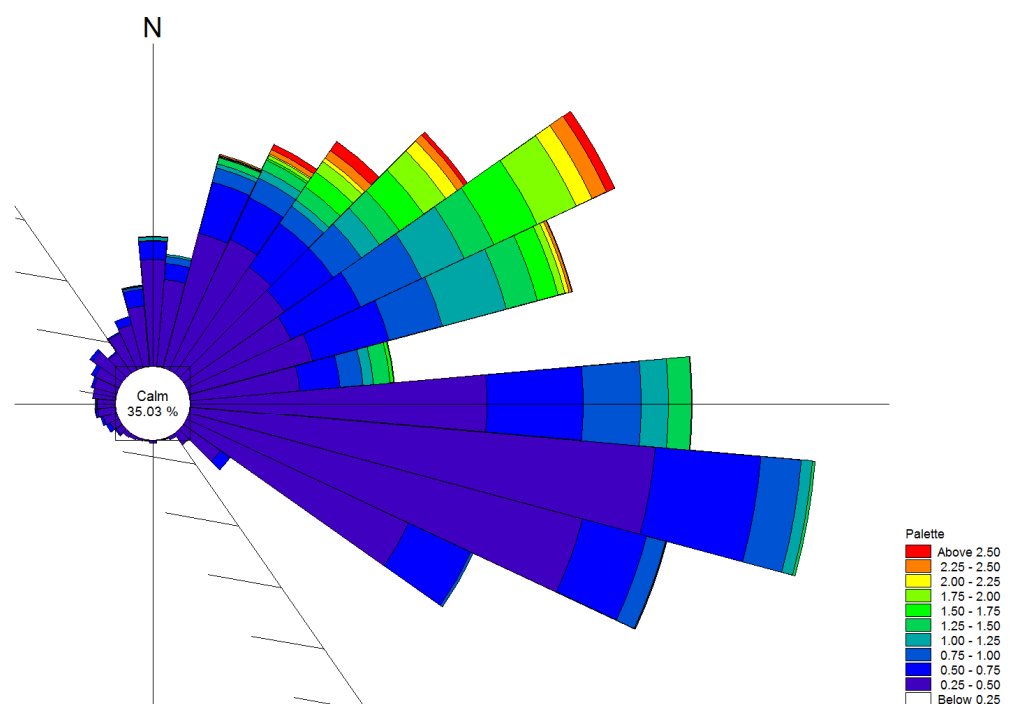


Figura 43 – Diagramma polare altezza d'onda-frequenza dell'anno 2007

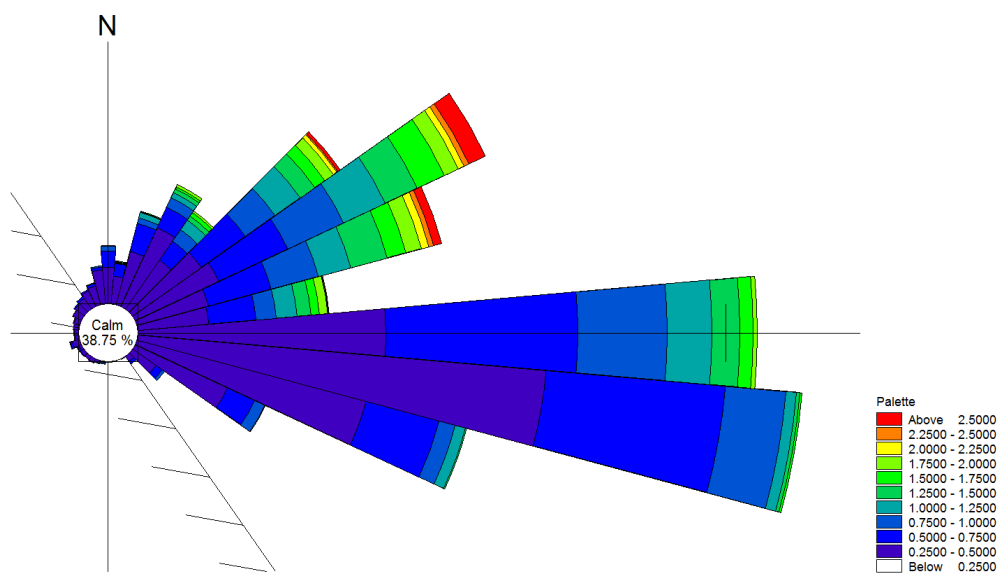


Figura 44 - Diagramma polare altezza d'onda-frequenza dell'anno 2008

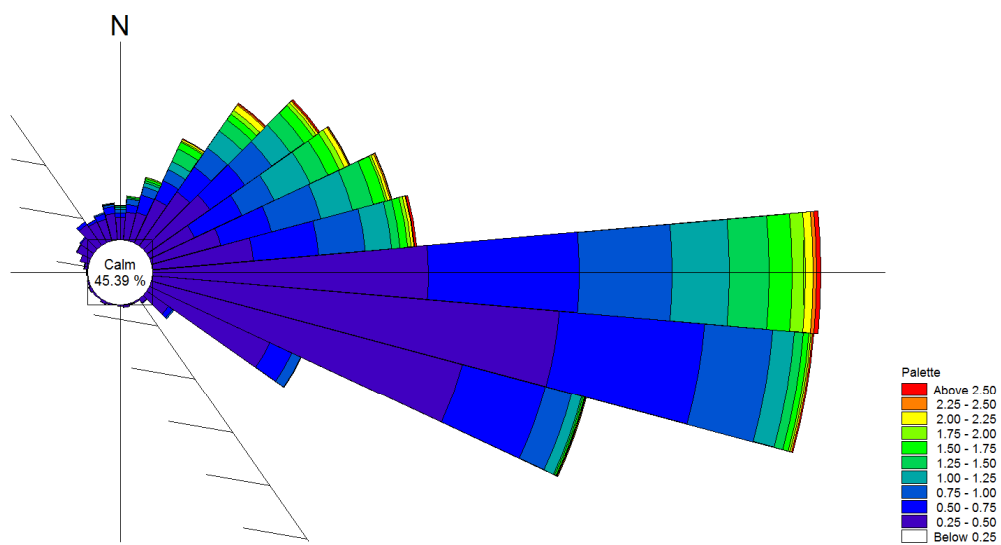


Figura 45 - Diagramma polare altezza d'onda-frequenza dell'anno 2009

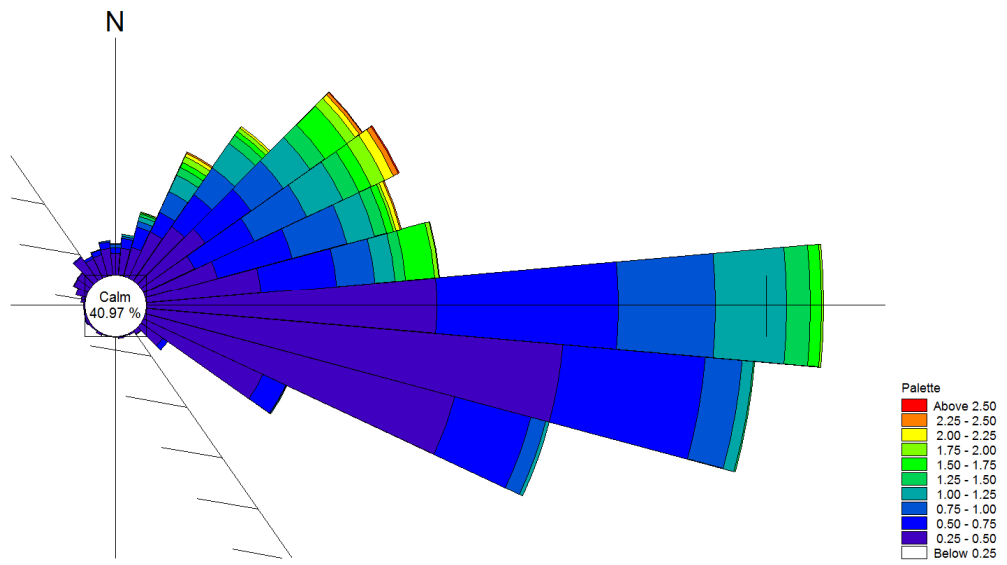


Figura 46 - Diagramma polare altezza d'onda-frequenza dell'anno 2010

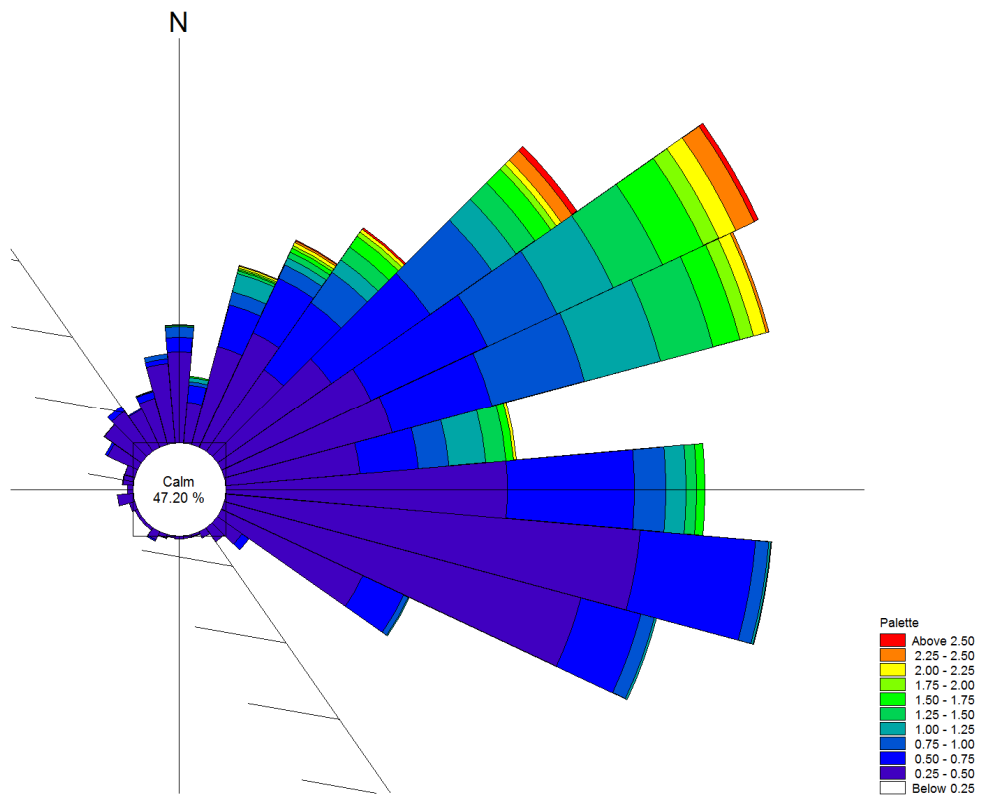


Figura 47 - Diagramma polare altezza d'onda-frequenza dell'anno 2011

Facendo riferimento ai grafici di cui sopra, si considera bacino di calma l'insieme degli eventi che presentano un'altezza d'onda significativa inferiore ai 25 cm.

Dai diagrammi si evince che il clima è dominato da venti di levante e scirocco, escluso l'anno 2011 che presenta una predominanza di eventi di bora; si nota che i venti provenienti da nord nord-est sono causa dei moti ondosi a più alto contenuto energetico.

È bene specificare che i dati immagazzinati dalla boa presentano delle discontinuità a causa del non funzionamento del sistema per alcuni periodi; si riportano quindi le percentuali dei dati mancanti (Tabella 3)

ANNO	DATI ACQUISIBILI	DATI ACQUISITI	% DATI MANCANTI
2007	11760	10096	14
2008	17568	15635	11
2009	17520	14238	19
2010	17520	15225	13
2011	17520	15976	9

Tabella 3 - Funzionamento della boa NAUSICAA dal 2007 al 2011; Si considera che la boa rilevi dati ogni 30 minuti per tutti i giorni dell'anno. Nel 2007 si hanno dati dal mese di Maggio in poi

3.2 Stato di Cattolica all'anno 2006

Nel tratto Cattolica-Rimini Il trasporto solido litoraneo è diretto prevalentemente da Sud verso Nord. Nel tratto Misano-Riccione Sud raggiunge valori tra i più elevati dell'intero litorale regionale.

L'elevata capacità di trasporto del mare e la scarsa alimentazione naturale proveniente dai fiumi marchigiani, dalla falesia di Gabicce e dal fiume Conca sono le cause alla base dei forti processi erosivi instauratisi fin dagli anni '50 tra Cattolica e Riccione.

Cattolica infatti è stata protetta negli anni '60 con 18 scogliere che chiudono lato mare l'intero litorale comunale, a partire dal porto fino al pennello di chiusura in prossimità della foce del Conca.

Al 2006 a Cattolica la spiaggia era in equilibrio e, all'interno delle prime 10 scogliere, si verificava da alcuni decenni un continuo accumulo di sabbia che ha come effetto negativo la riduzione del ricambio idrico e il conseguente peggioramento qualitativo delle acque di balneazione.

Per migliorare la circolazione delle acque, ogni anno viene asportata della sabbia. Tra il 2000 e il 2006 sono stati asportati, tra la foce del Ventena e il porto di Cattolica, più di 100.000 m³ di sabbia.

Diversamente dal periodo precedente in cui erano in erosione, anche i fondali esterni alle scogliere di Cattolica erano in equilibrio [Prete et al. 2007].



Figura 48 - Arco costiero da Cattolica a Rimini

3.2.1 La rete topo-batimetrica



Figura 49 - Porto di Cattolica-porto di Riccione, batimetrica 2006

Per rendere possibile il monitoraggio della costa, la prima cosa necessaria fu creare una rete topo-batimetrica lungo la quale eseguire i rilievi. Nel 1983 IDROSER pensò quindi di suddividere il litorale in sezioni di rilievo; ovviamente maggiore è il numero di sezioni di rilievo, maggiore è il grado di dettaglio che si riesce a raggiungere, ma anche la richiesta economica di ogni campagna di monitoraggio.

Nel caso del litorale Emiliano-Romagnolo, interamente costituito da costa bassa e sabbiosa omogenea morfologicamente lungo l'asse longitudinale, si può ottenere un buon compromesso tra ottimizzazione dei costi e rappresentatività dei dati ponendo la distanza tra due sezioni successive a circa 500 m l'una dall'altra [Preti et al. 2007].

Dopo varie modifiche intercorse negli anni, la rete rilevata nel corso della IV campagna (2006) è quindi costituita da 251 profili, distribuiti uniformemente sui 130 Km di costa regionale. A questi sono stati aggiunti oltre 200 km di profili longitudinali e alcune aree rilevate a semina di punti [Preti et al. 2007].

La profondità di chiusura, tra Cattolica e i primi 2 km a Nord di Porto Garibaldi, viene considerata alla batimetrica degli 8 m.

Per quanto attiene ai valori altimetrici, la IV campagna è stata riferita alle quote assolute ricavate dal rilievo 2005 della rete ARPA per il controllo della subsidenza. Tali quote sono riferite al Caposaldo I.G.M. di Sasso Marconi, ritenuto stabile dallo stesso I.G.M. a sua volta riferito al medio mare di Genova 1943.

La spiaggia di Cattolica è compresa tra le sezioni 31L5 e 36L5 (Figura 49) che saranno l'oggetto di studio di questo elaborato.

3.2.2 Metodi e strumentazioni

Per realizzare tutte le operazioni di posizionamento piano-altimetrico è stato adottato un GPS differenziale (DGPS) a doppia frequenza con modalità RTK-OTF. Sulla base delle specifiche fornite dall'impresa che ha eseguito il lavoro, questo strumento garantisce in tempo reale una precisione altimetrica di +/- 0.02 m e planimetrica di +/- 0.05 m.

I rilievi sono stati condotti in modo tale da far sì che la massima distanza tra la Reference Station ed il Rover non superasse i 10 km, mentre il collegamento tra i due ricevitori è stato realizzato tramite rete telefonica GSM, che, oltre ad una maggiore stabilità della connessione e ad un minore disturbo del segnale, garantisce una riduzione del delay time tra l'istante dell'emissione del dato di correzione da parte della Base Station e quello di ricezione da parte del Rover, condizione essenziale per potere combinare il GPS con il multibeam. La calibrazione per l'inquadratura altimetrica è stata riferita al piano definito dalla rete di livellazione ARPA 2005, in modo tale da potere determinare l'esatta configurazione del geoide locale.

Il GPS è stato accoppiato o meno con altre apparecchiature in base alla zona di profilo da indagare. In base alla strumentazione più adatta ad operare nelle diverse configurazioni morfologiche della costa, ogni profilo batimetrico è stato suddiviso in tre zone convenzionalmente denominate:

- spiaggia emersa: tra la testa di sezione e la batimetrica 0.3÷0.5 m;
- spiaggia sommersa: tra la batimetrica 0.3 m e la batimetrica 1.5 m o alla linea della scogliere laddove presenti;
- litorale sommerso: dalla batimetrica 1.5 m, o dall'esterno delle scogliere laddove presenti, fino alla fine del profilo.

Ciò premesso, il rilievo complessivo è stato portato a termine utilizzando i seguenti assetti:

- spiaggia emersa: DGPS montato su mezzo fuoristrada o trasportato manualmente con acquisizione di punti distanti circa 2-5 m l'uno dall'altro (Figura 50);
- spiaggia sommersa: DGPS accoppiato con ecoscandaglio singlebeam, installati su un gommone, con i quali si è rilevato un punto per ogni metro percorso. L'ecoscandaglio utilizzato era caratterizzato da una precisione pari a +/- 0.5 % della profondità rilevata;

- litorale sommerso: DGPS accoppiato con ecoscandaglio multibeam, entrambi installati su una barca. Il multibeam ha rilevato punti con una precisione planimetrica di ± 0.1 m ed una batimetrica di ± 0.02 m e restituiti secondo una griglia con maglie quadrate di 1 m di lato.

Per ridurre ogni interferenza esterna, e quindi aumentare la precisione dei rilievi, sui due mezzi nautici sono stati installati i seguenti strumenti:

- sistema di misurazione della velocità del suono (sonda CTD);
- sistema di rilevamento del moto ondoso e dei movimenti di rollio e beccheggio.

L'utilizzo della sonda CTD si è reso necessario poiché nella corretta valutazione della profondità del fondale assume un'importanza fondamentale la conoscenza della velocità di propagazione del suono nell'acqua, dato che questo parametro dipende dalla temperatura e dalla salinità della colonna d'acqua [Preti et al. 2007].



Figura 50 - Automezzo attrezzato con GPS per il rilievo della spiaggia emersa

3.3 Profili della spiaggia di Cattolica del 2006

I risultati ottenuti da ARPA dopo la IV campagna di monitoraggio sono evidenziati nei profili riportati in seguito:

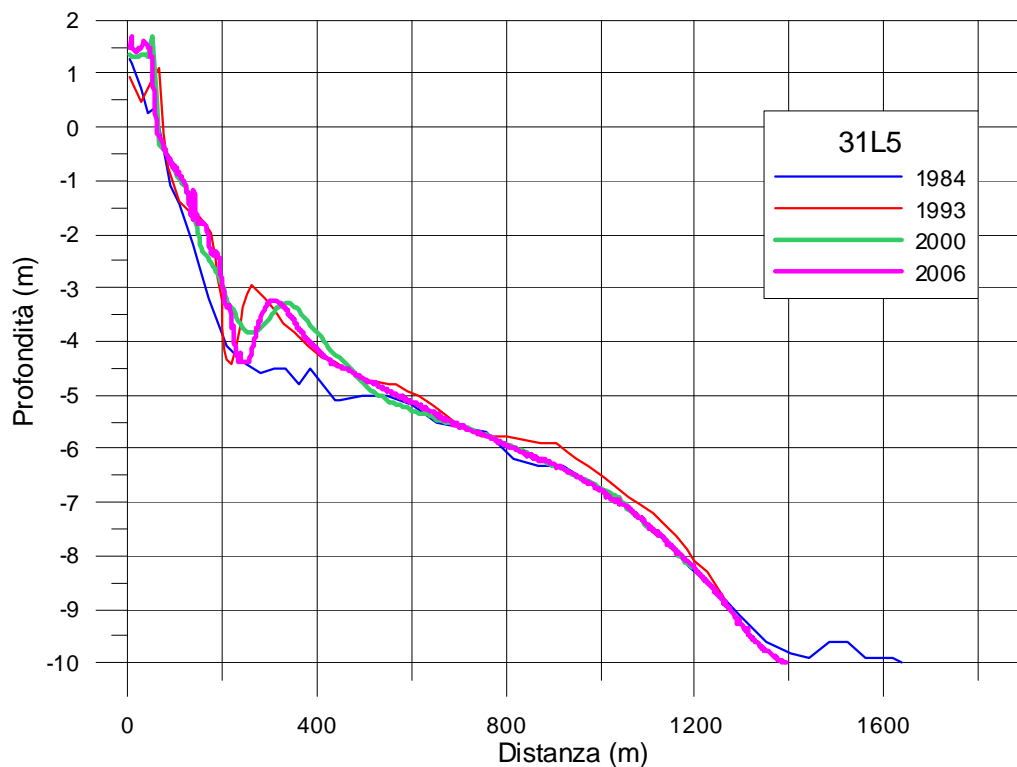


Figura 51 - Profili sezione 31L5 dal 1984 al 2006

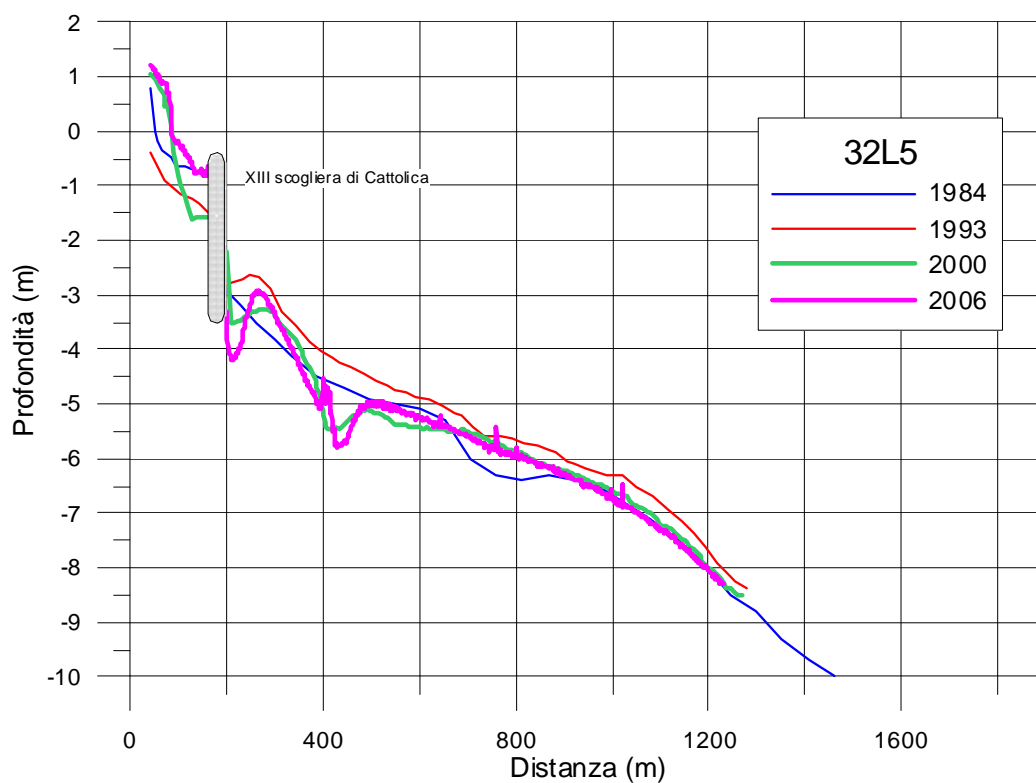


Figura 52 - Profili sezione 32L5 dal 1984 al 2006

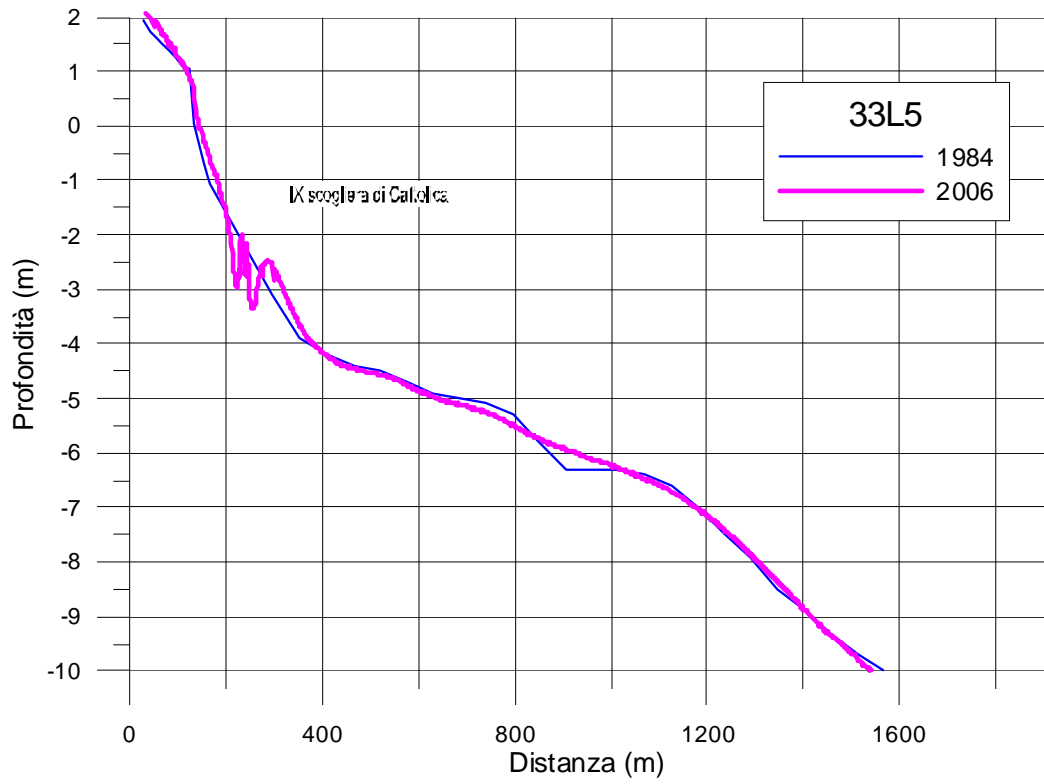


Figura 53 - Profili sezione 33L5 dal 1984 al 2006

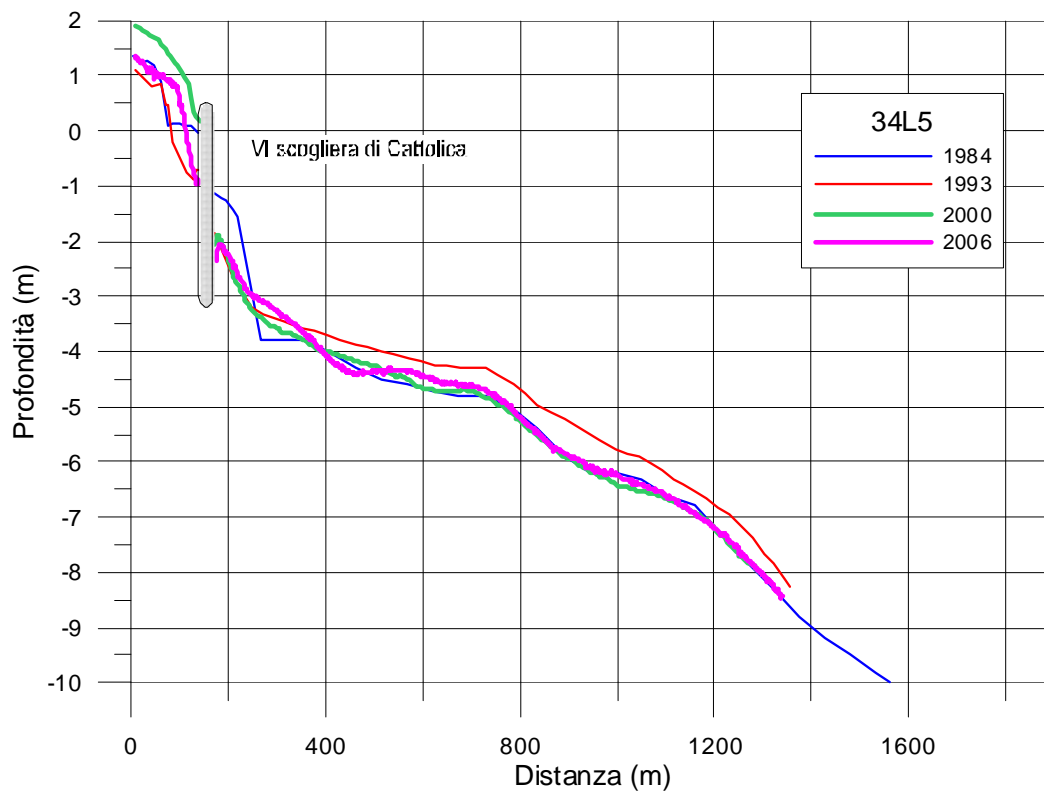


Figura 54 - Profili sezione 34L5 dal 1984 al 2006

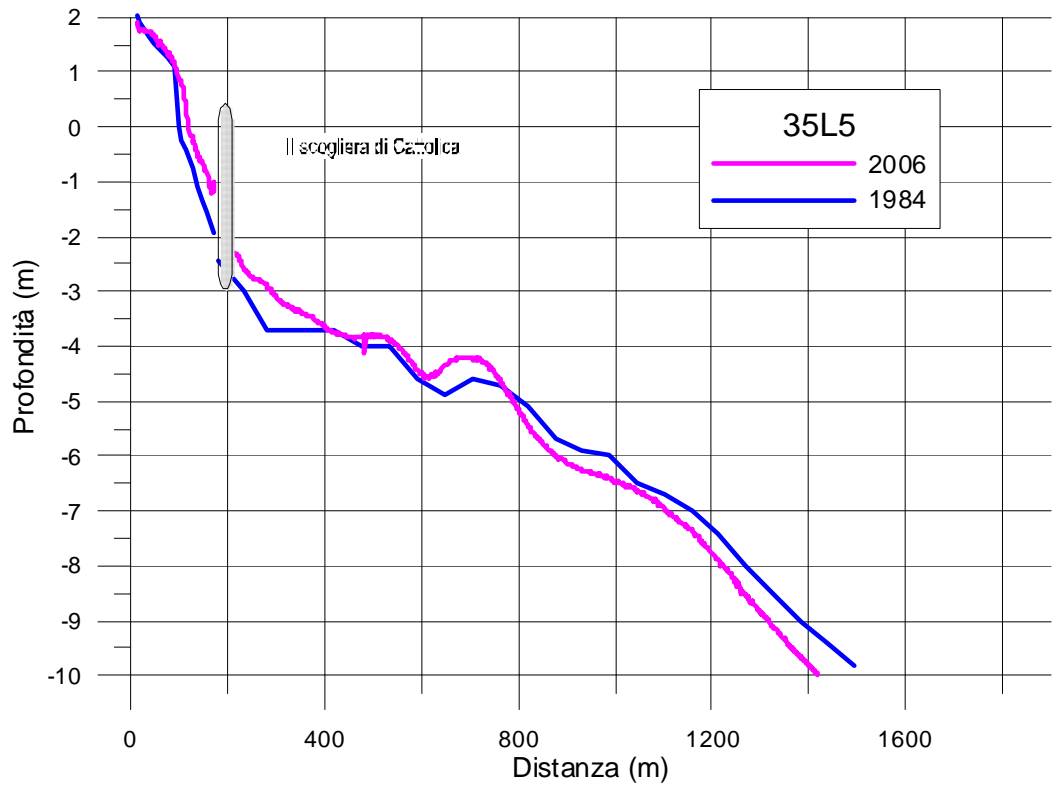


Figura 55 - Profili sezione 35L5 dal 1984 al 2006

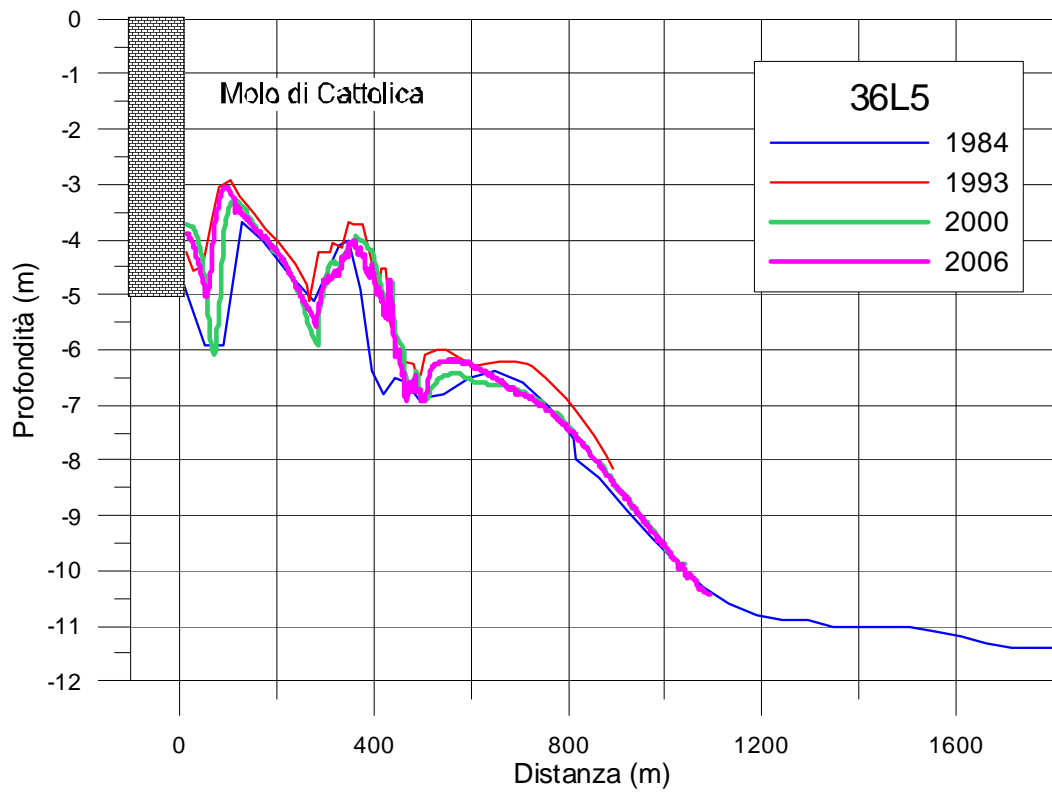


Figura 56 - Profili sezione 36L5 dal 1984 al 2006

La sezione 33L5 (Figura 53) passa nel varco della nona scogliera; è bene precisare che nel rilievo del 1984 di questa sezione non si hanno dati nei 125 m comprensivi della scogliera (dalla distanza di 167 m alla distanza di 293 m dal riferimento), quindi in quel tratto il grafico presenta una interpolazione lineare dei due punti e non il reale andamento, come invece avviene nel profilo del 2006.

I dati relativi alla sezione 33L5 e alla sezione 35L5 (Figura 55) sono stati rilevati solo nel 1984, nel 2006 e, come vedremo, nel 2012; lungo questi profili non si hanno quindi informazioni significative.

Inoltre le scogliere riportate in figura, sono solo rappresentative della loro presenza e non della loro forma o dimensione.

Per la lettura dei profili è necessario considerare gli interventi eseguiti sulla spiaggia prima della campagna di monitoraggio. Essendo Cattolica una zona tendenzialmente di accumulo, è stata utilizzata come luogo di prelievo per eseguire i ripascimenti nella zona di Misano soggetta ad erosione. Tra il mese di Febbraio ed il mese di Marzo del 2005 sono stati asportati 25650 m³ di sabbia distribuiti lungo tutta la spiaggia.

Dalla Figura 52 si vede che il profilo 32L5 è caratterizzato da un evidente accumulo nella zona compresa tra scogliera e spiaggia tra il 2000 ed il 2006, mentre si ha l'erosione al piede della scogliera lato mare; nello stesso lasso temporale si vede come il profilo 34L5 (Figura 54) sia in sostanziale equilibrio tranne che per la zona lato terra della scogliera che presenta erosione, in parte dovuta all'asportazione antropica di sabbia.

Grazie alle batimetrie costruite da ARPA è possibile avere un quadro più generale e completo dell'andamento della costa tra il 2000 ed il 2006; si evidenziano infatti graficamente le zone di deposito ed erosione nel continuo invece che in singole sezioni (Figura 57).

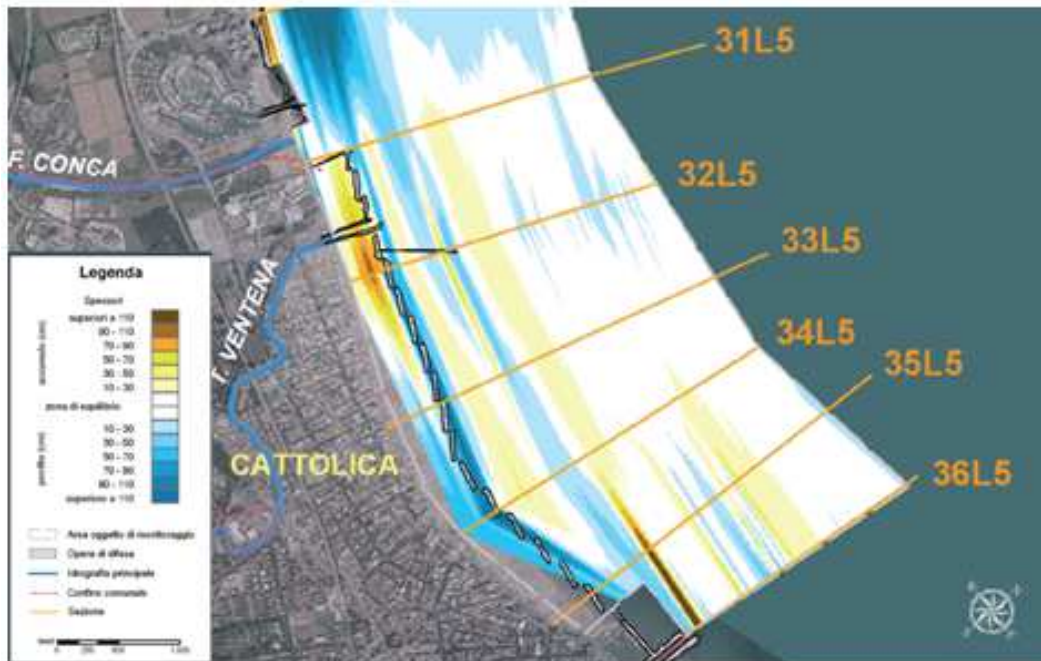


Figura 57 - Cattolica: accumuli e perdite di materiale nel periodo 2000-2006

CAPITOLO 4

METODOLOGIA E RISULTATI

L'obiettivo di questa tesi riguarda l'elaborazione dei dati forniti da ARPA riguardo la V campagna di monitoraggio (2012) del litorale Emiliano-Romagnolo. Le tecniche e le modalità di rilievo sono state descritte nel Capitolo 3. I dati raccolti sono costituiti da un set di valori plano-altimetrici tramite i quali sarà possibile ricostruire lo stato del litorale, ed eseguire un'analisi di lungo periodo confrontando lo stato attuale con i dati storici (1984, 1993, 2000, 2006). L'elaborazione dei dati è stata possibile utilizzando tre software. Con ArcGIS 10 si sono estratti i profili di interesse lungo le sezioni di rilievo; Grapher 8 ha permesso di graficare i profili e calcolare i volumi; tramite Surfer 9 si sono calcolate le batimetrie.

Nell'elaborato si è focalizzata l'attenzione sulla spiaggia di Cattolica che comprende le ultime sei sezioni a sud del litorale.

In questo capitolo verrà descritta in dettaglio la metodologia con la quale si è operato ed i risultati ottenuti.

4.1 Estrazione dei Profili

I dati forniti da ARPA, sono sotto forma di file “.asc” contenenti le coordinate di tutti i punti rilevati. Il sistema topografico di riferimento con cui sono stati rilevati i dati è il WGS84-UTM fuso 33N, mentre Per quanto attiene ai valori altimetrici, il riferimento è alle quote assolute ricavate dal rilievo 2005 della rete ARPA per il controllo della subsidenza. Tali quote sono riferite al Caposaldo I.G.M. di Sasso Marconi, ritenuto stabile dallo stesso I.G.M. a sua volta riferito al medio mare di Genova 1943.

Per ogni zona del litorale i file creati sono tre: uno contenente i dati rilevati a terra tramite GPS, uno con i rilievi singlebeam e uno con i punti raccolti tramite multibeam (Capitolo 1 e Capitolo 3).

Per prima cosa è stato necessario convertire i dati da WGS 84 al sistema di riferimento UTM-ED 50 fuso 32* (si ottiene sottraendo 4'000'000 dalle

coordinate in Y nel sistema di riferimento UTM-ED 50 fuso 32); questo è stato possibile con l'ausilio del software SURFER 9.0 (Figura 58).

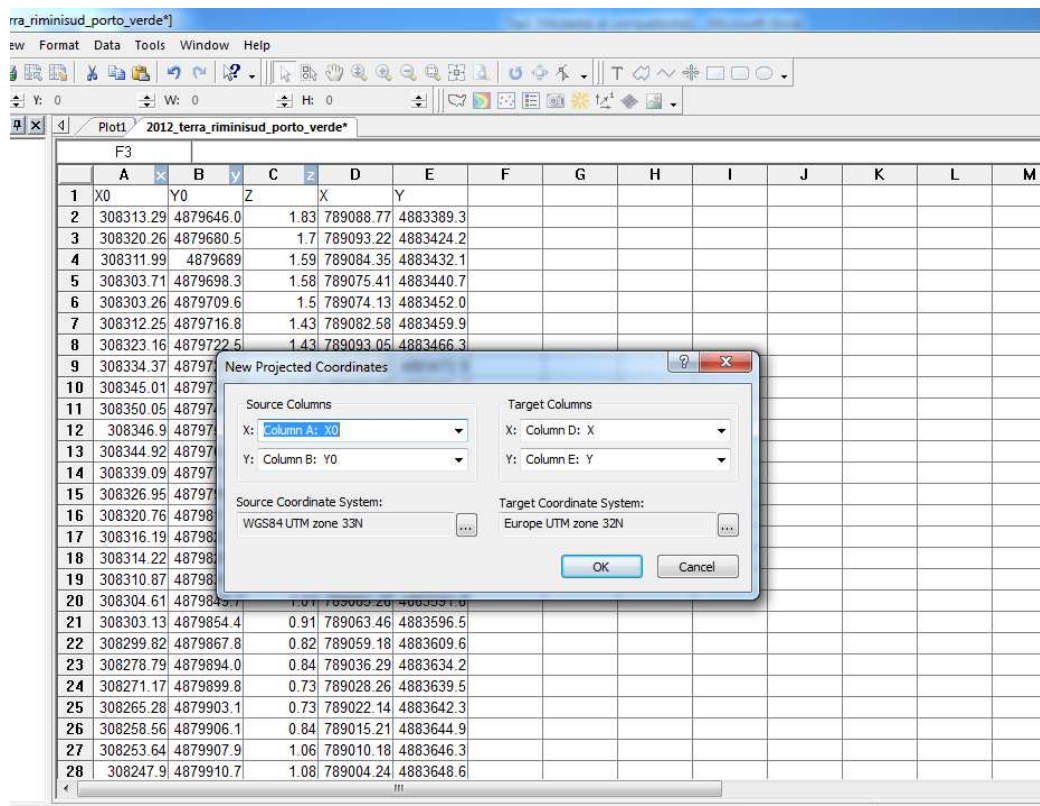


Figura 58 - Conversione sistema di riferimento tramite SURFER 9

La conversione si è resa necessaria per poter inserire le coordinate dei punti rilevati sul software ArcGIS, in modo da avere lo stesso sistema di riferimento sia per i rilievi, sia per le sezioni a cui si devono sovrapporre.

I file sono stati poi salvati come testo (.txt) ed importati in ArcGIS insieme alle sezioni e alle opere esistenti; è stato così possibile trasformarli in shapefile ed unirli in uno unico, tramite il quale si possono visualizzare ed utilizzare tutti i punti rilevati in maniera digitale e georeferenziata (Figura 58 e Figura 59).

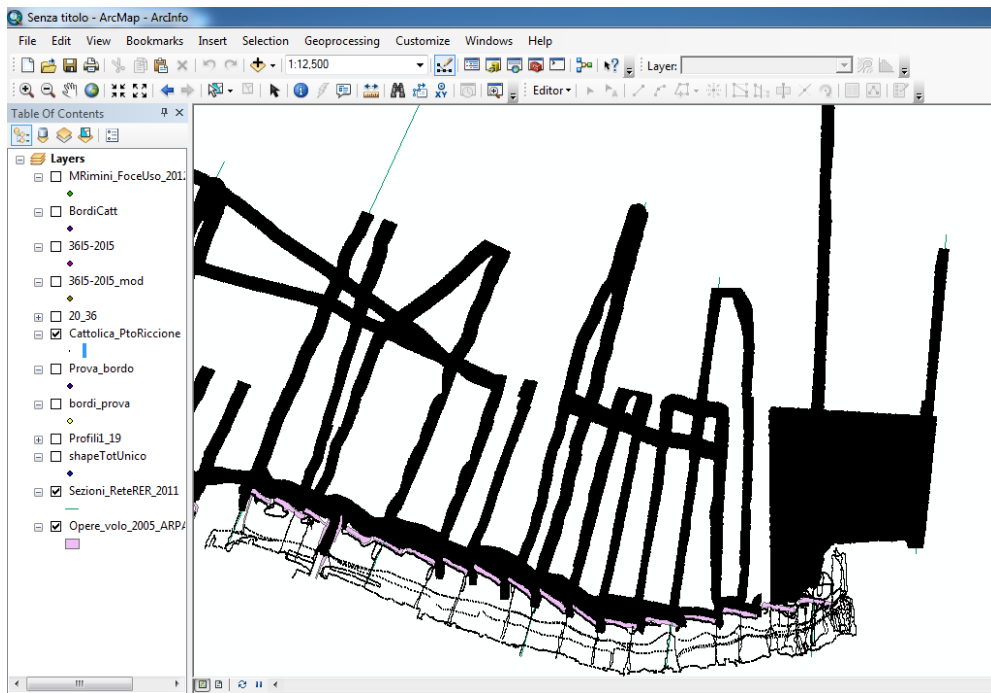


Figura 59 - Visualizzazione punti rilevati su ArcGIS

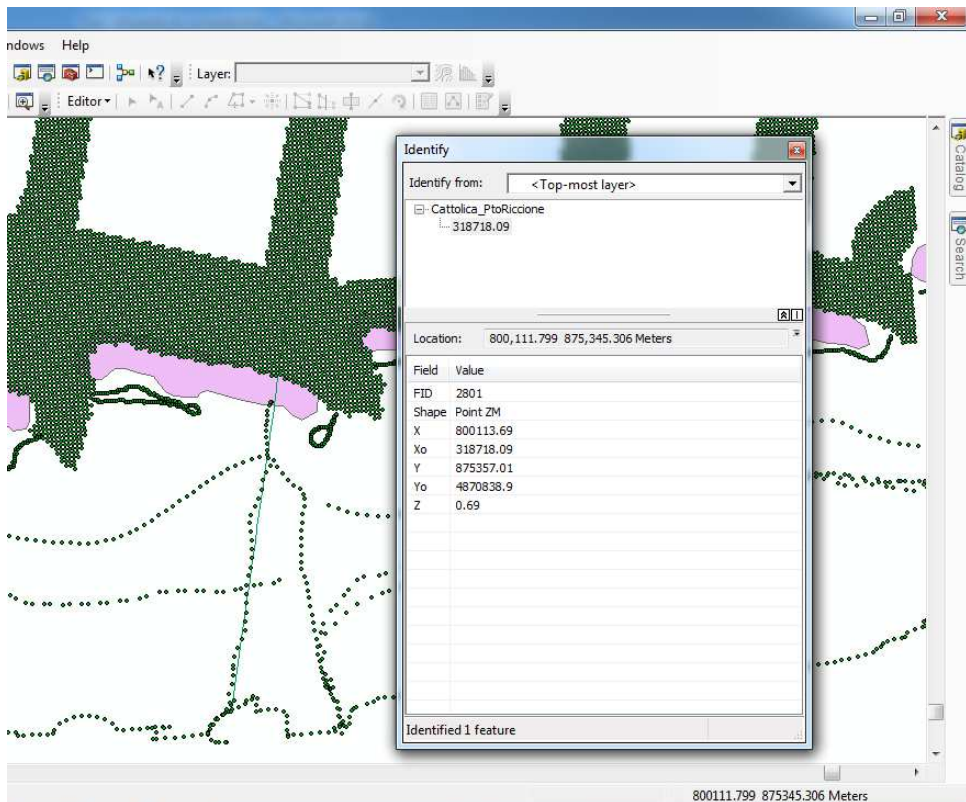


Figura 60 - Dettaglio di punti intorno alla sezione 34L5

A questo punto per estrarre e graficare i profili sono stati selezionati tutti i punti distanti al massimo un metro dalle sezioni di interesse, ritenuti rappresentativi

dell'andamento del terreno lungo tali linee; una volta selezionati i punti relativi ad una sezione è stato possibile “isolarli” dagli altri e creare dei file contenenti le coordinate geografiche dei punti di ogni singola sezione.

I dati sono poi stati riordinati in ordine crescente rispetto alle variabili geografiche X_0 ed Y_0 (sistema WGS84); con i dati così disposti si è calcolata la distanza progressiva; il riferimento deve essere uguale per tutti i profili di anno in anno:

$$d = \sqrt{(X_o - X_r)^2 + (Y_0 - Y_r)^2} \quad (43)$$

Dove d è la distanza progressiva dal riferimento; X_0 e Y_0 sono le coordinate geografiche dei punti di rilievo; X_r e Y_r sono le coordinate geografiche del punto preso come riferimento.

Una volta calcolata la distanza progressiva è stato possibile graficare i profili con Grapher 8.0 ponendo sulle ascisse la distanza d e sulle ordinate la quota altimetrica Z .

4.1.1 Risultati

Riporto di seguito i grafici relativi alle sezioni di interesse; i profili del 2012 saranno confrontati con quelli del 2006:

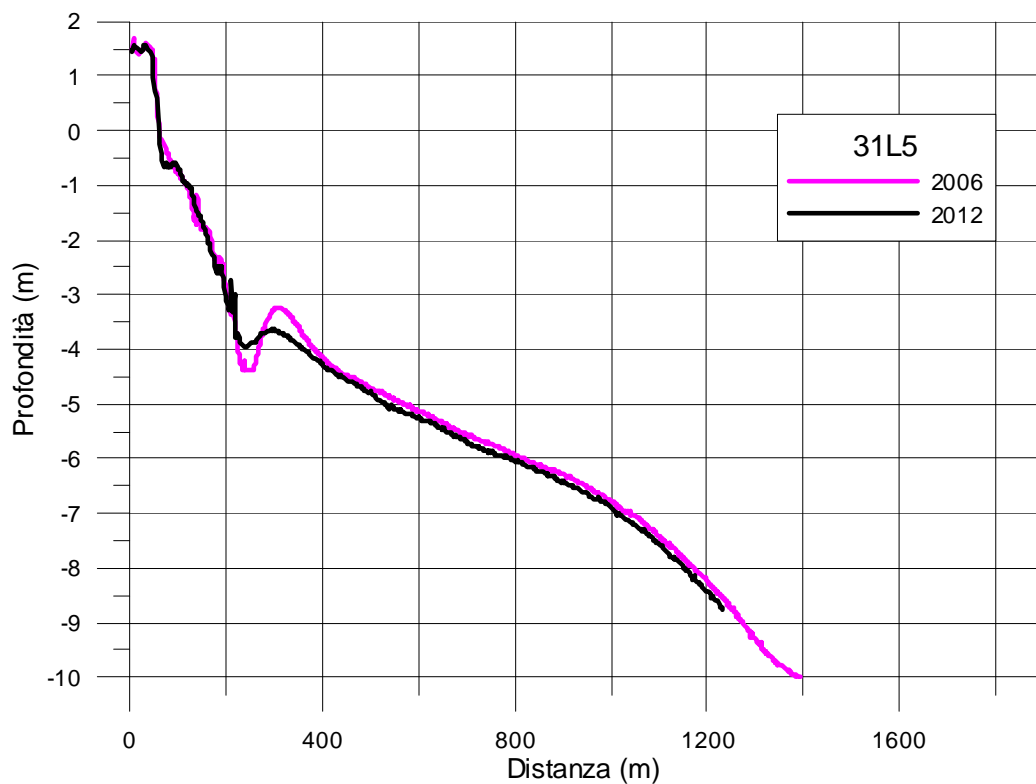


Figura 61 - Profili sezione 31L5 anni 2006 e 2012

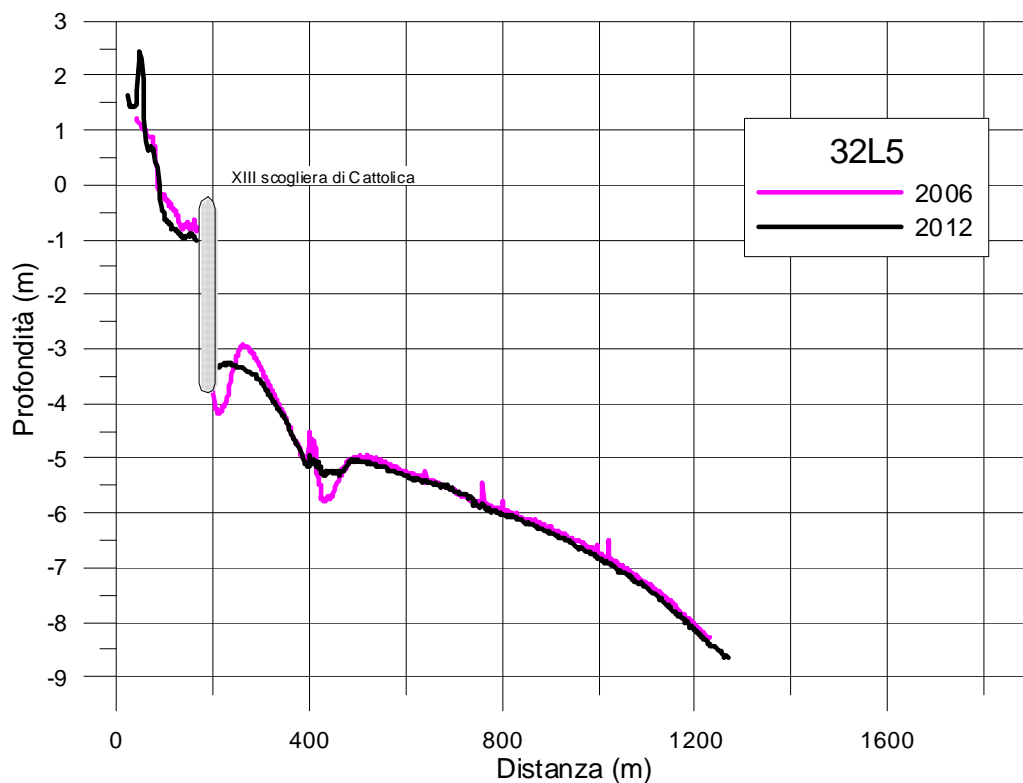


Figura 62 - Profili sezione 32L5 anni 2006 e 2012

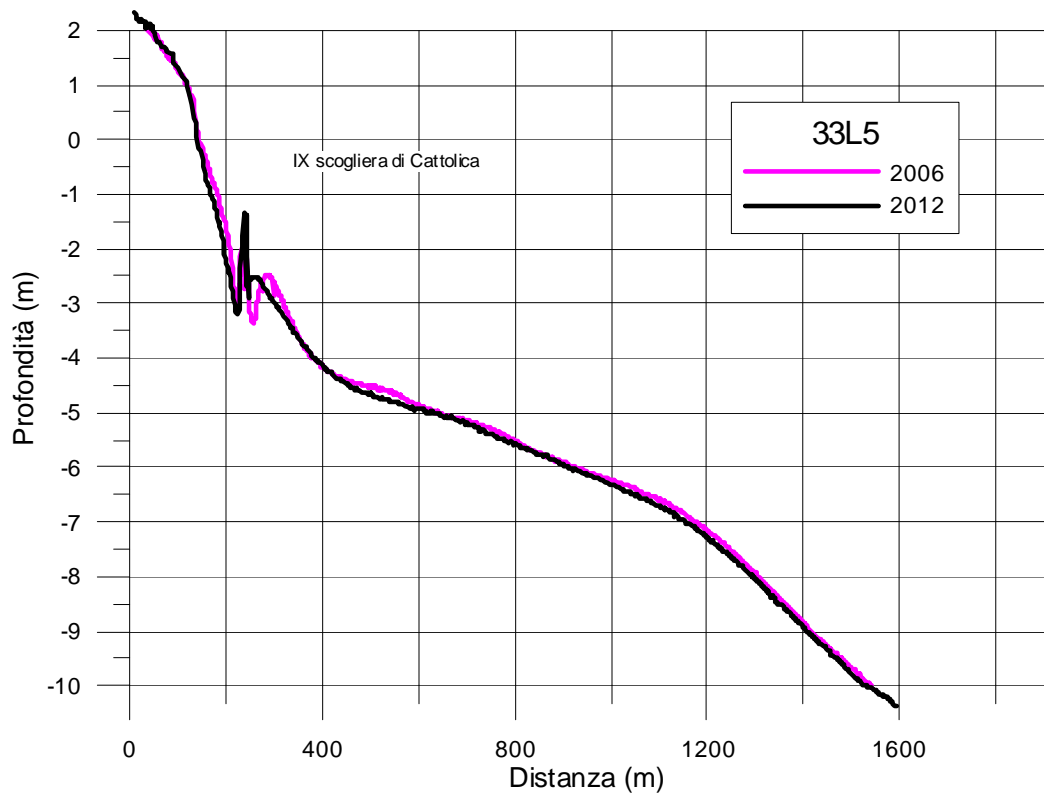


Figura 63 - Profili sezione 33L5 anni 2006 e 2012

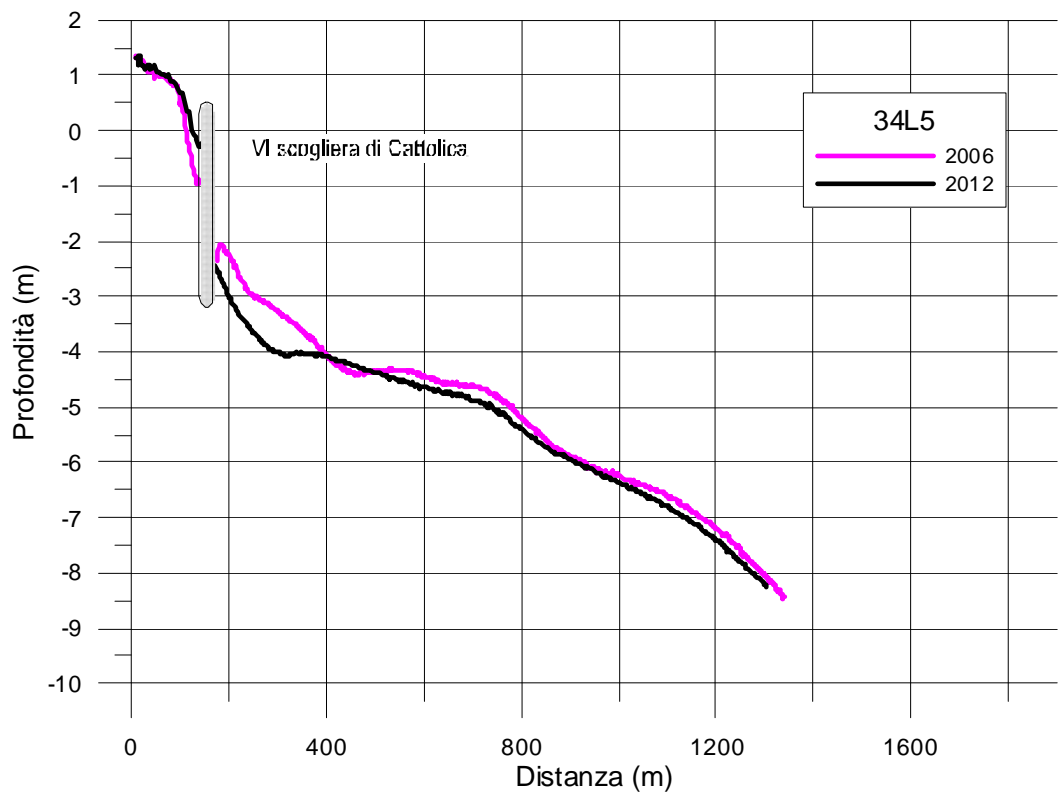


Figura 64 - Profili sezione 34L5 anni 2006 e 2012

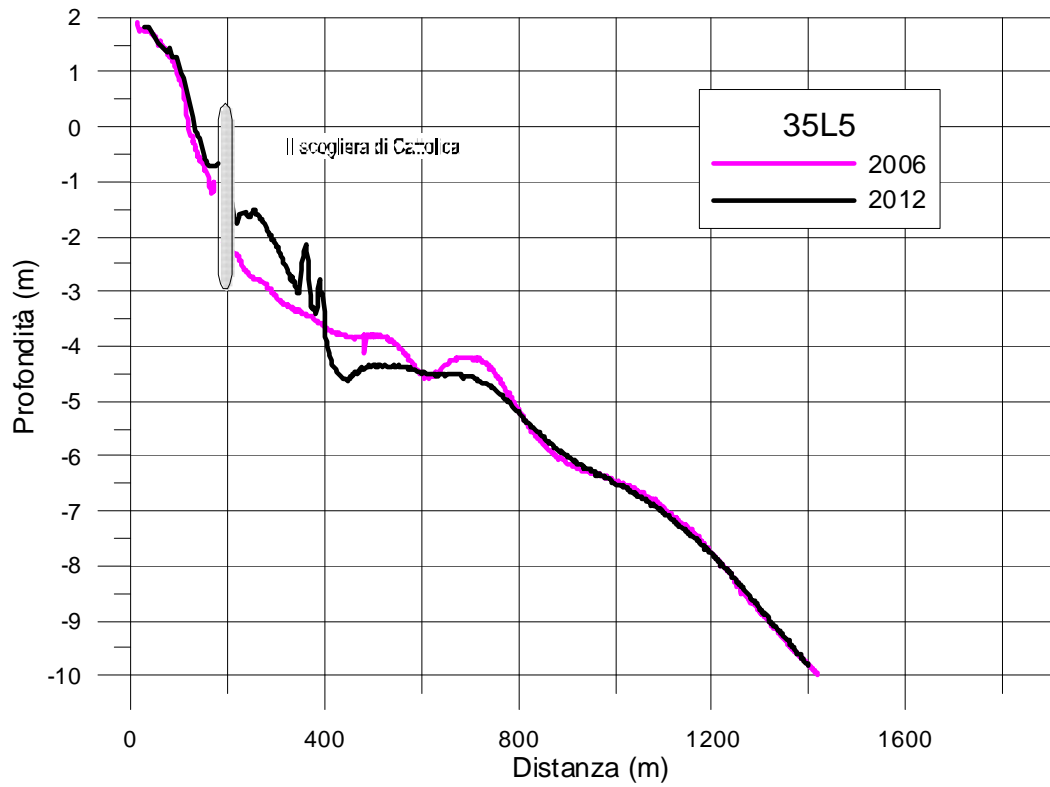


Figura 65 - Profili sezione 35L5 anni 2006 e 2012

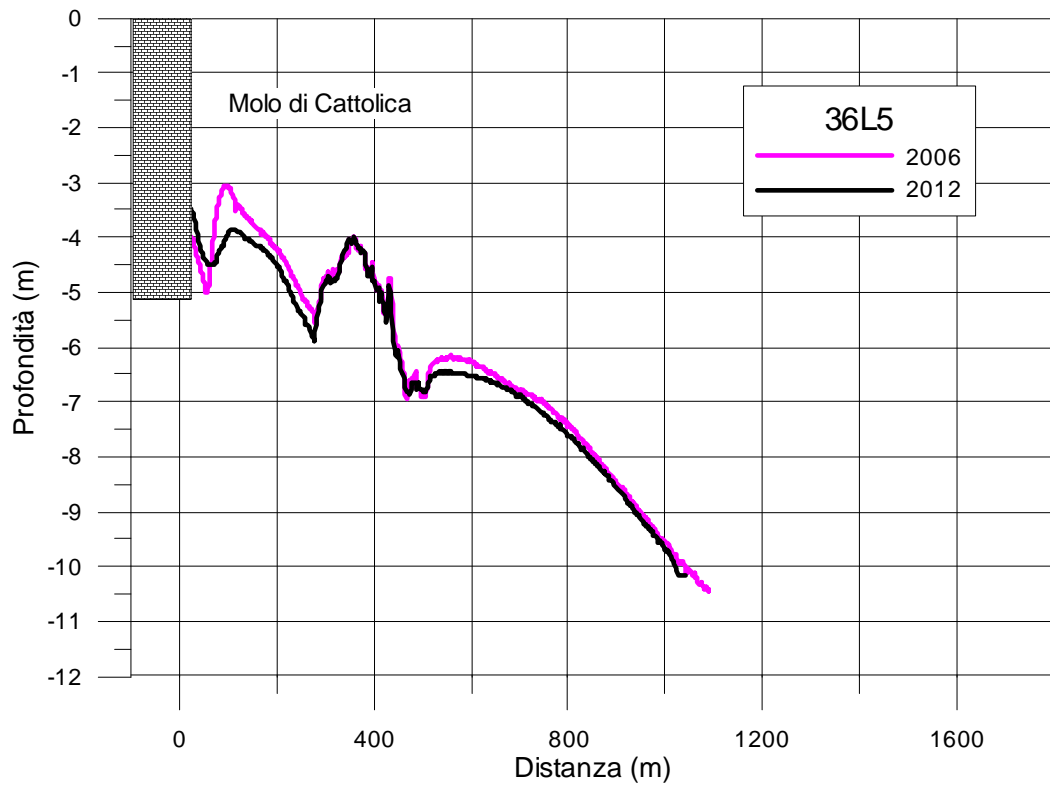


Figura 66 - Profili sezione 36L5 anni 2006 e 2012

Dai profili si evince come la spiaggia sia sostanzialmente in equilibrio nelle zone più a nord, mentre nella zona antistante la darsena si ha un accumulo di sedimenti dovuto proprio alla costruzione di quest'ultima. Si vede in Figura 61 che nel profilo 31L5 non si sono verificate modifiche importanti se non per l'appiattimento della barra a circa 150 m dalla riva.

Guardando il profilo 32L5 (Figura 62) le modifiche che si sono verificate riguardano la formazione di una duna sulla spiaggia emersa, posta nel periodo invernale a protezione della costa, ed un accumulo di sabbia a tergo della scogliera che ne favorisce la stabilità.

Il profilo 33L5 si è mantenuto invariato mentre il 34L5 presenta accumulo nella zona lato riva della scogliera ed erosione lato mare; avvicinandoci alla darsena si nota come il profilo 35L5 (Figura 65) sia fortemente in accumulo. L'ultimo profilo (36L5 in Figura 66) presenta perdita di materiale.

Per eseguire un'analisi corretta di questi risultati è necessario tenere in considerazione i ripascimenti eseguiti sul litorale durante i periodi di studio; essendo il litorale di Cattolica una zona in accumulo, viene asportata sabbia per eseguire ripascimenti nelle zone limitrofe. Si riportano in Tabella 4 tutti gli interventi effettuati dal 2006 al 2011; le zone (o celle) in cui è stato diviso il litorale sono riportate in Figura 67.

La maggior parte del volume di sabbia asportato interessa la spiaggia emersa che comprende le sezioni 32L5, 33L5, 34L5 e 35L5 (cella 3); si capisce quindi che anche se i profili non sembrano aver subito modifiche nei sei anni di studio, in realtà le barriere emerse hanno provocato un accumulo di sabbia sostanzioso lungo la spiaggia. La perdita di materiale del profilo 36L5 è in parte da attribuire al dragaggio di sabbia nella cella 1.

Guardando invece la duna del profilo 32L5 risulta dalla tabella una movimentazione di materiale dalla cella 3 alla cella 2, che viene appunto utilizzato per la creazione della duna invernale in quella zona.

Eseguendo un calcolo numerico dei volumi si possono avere informazioni più dettagliate riguardo la modificazione naturale e non della spiaggia, come si vedrà nel paragrafo successivo.

RIPASCIMENTI LITORALE CATTOLICA 2006/2011

N	DATA FINE (mese/anno)	AREA RIPASCIMENTO	TRATTO Km.	N° Cella	VOLUME PER CELLA mc	VOLUME UNITARIO PER CELLA mc/ml media	PROVENIENZA SABBIA	N° Cella provenienza	COLLOCAZIONE SABBIA
1	primavera 2006	MISAND pennelli			18,600		arenile cattolica		spiaggia emersa
		PORTO VERDE SUD			900		foce ventena		spiaggia emersa
2	primavera 2007	MISAND pennelli			16,800		mare foce ventena		mare
		MISAND pennelli	1.3	12	17,000 4,000	16.15	porto Cattolica arenile Cattolica	1 3	spiaggia emersa spiaggia emersa
3	autunno 2008	MISAND pennelli	1.3	12	6,850	5.27	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
		PORTO VERDE SUD	0.04	8	500	12.50	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
4	primavera 2009	PORTO VERDE NORD	0.16	10	1,000	6.25	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
		MISAND pennelli	0.3	12	3,200	10.67	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
5	primavera 2010	PORTO VERDE SUD	0.1	8	1,000	14.71	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
		PORTO VERDE NORD	0.2	10	1,000	6.33	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
6	estate 2010	PORTO VERDE SUD	0.1	8	600	8.82	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
		PORTO VERDE NORD	0.2	10	750	5.00	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
7	inverno 2011	MISAND pennelli	0.4	12	2,500	6.25	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
		MISAND pennelli	0.3	12	4,800	16.00	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
8	primavera 2011	MISAND pennelli	0.5	12	1,890	3.78	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
		PORTO VERDE SUD	0.1	8	500	10.00	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
		PORTO VERDE NORD	0.1	10	1,000	8.33	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
		MISAND pennelli	0.4	12	7,300	18.25	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
		PORTO VERDE SUD	0.1	8	500	10.00	arenile Cattolica "NAVI"	6	spiaggia emersa
		COLONIA NAVI	0.2	6	500	3.33	arenile Cattolica "NAVI"	6	spiaggia emersa
		MISAND pennelli	0.3	12	4,000	13.33	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
		CATTOLICA NORD	0.5	4	4,000	8.00	arenile Cattolica	3	spiaggia emersa
TOTALE					6.31	99.190	15.71		

Tabella 4 - Ripascimenti Cattolica 2006/2011



Figura 67 - Divisione in celle del litorale

4.2 Calcolo dei Volumi

Per la determinazione dei volumi di materiale accumulati o erosi lungo il litorale emiliano-romagnolo sono stati confrontati i dati relativi ai rilievi topo-batimetrici eseguiti negli anni 2006 e 2012. Per ogni sezione è stata effettuata la sovrapposizione dei profili rilevati nelle quattro campagne topo-batimetriche.

Tramite un programma matematico si è proceduto poi al calcolo per integrali dell'area sottesa da ogni profilo, quindi si è quantificato il volume di materiale presente al momento del rilievo, espresso in m per metro lineare.

La differenza dei volumi fra due profili della stessa sezione, permette di determinare gli accumuli o le perdite avvenute nel periodo intercorso fra i due rilievi; tale procedura ha il pregio di eliminare eventuali errori sistematici che si elidono al momento della sottrazione. Affinché il confronto tra i profili abbia validità il dominio di integrazione deve essere uguale, quindi si è dovuto procedere con un'ulteriore selezione dei dati.

Il calcolo dell'integrale inizia dal primo punto del rilievo che meno si addentra nell'entroterra, quindi i dati retrostanti tale punto appartenenti agli altri profili non sono stati considerati.

Per favorire l'analisi interpretativa dei processi che si sono verificati nell'intervallo di tempo che separa due campagne di rilievo, il calcolo dei volumi di materiale accumulato o perso è stato effettuato separatamente per spiaggia emersa, prima fascia di spiaggia sommersa e fondale. Lungo ogni profilo il calcolo è stato così effettuato a partire dalla testa di sezione nei seguenti 3 intervalli:

- dalla testa di sezione alla batimetrica dei 0 m rappresentativa della linea di riva;
- dalla batimetrica dei 0 m alla scogliera lato riva; questo punto è stato selezionato tra il più distante dalla scogliera tra gli ultimi due punti del rilievo del 2006 e quello del 2012; in assenza di opere si considera la batimetrica dei -2.5m;
- dalla scogliera lato mare alla batimetrica dei -8m considerata come sezione di chiusura; il punto di partenza viene considerato come il punto più vicino alla scogliera tra i primi due punti del rilievo 2006 e quello del 2012.

Le variazioni di volume così ottenute sono il risultato di tutti i fattori che hanno contribuito all'evoluzione di quel determinato tratto di litorale nell'intervallo di tempo che separa le due campagne prese in considerazione: apporti fluviali, subsidenza, dinamica litoranea, ripascimenti artificiali, dragaggi, ecc.

I risultati del calcolo sono stati attribuiti ad una cella rappresentativa dell'area a cavallo della sezione stessa. I valori volumetrici per metro lineare di ogni sezione sono stati poi moltiplicati per la larghezza della cella, ottenendo così una variazione di volume per celle che ha permesso la copertura dell'intera costa regionale.

Se i profili rilevati nel corso delle varie campagne fossero perfettamente sovrapposti, l'esclusione dal calcolo delle opere di difesa, in primis le scogliere, risulterebbe superflua, poiché i volumi di materiale depositato o eroso sono ottenuti per differenza, quindi l'errore sistematico introdotto dal corpo estraneo al fondale si annullerebbe. Tuttavia i vari rilievi non sono perfettamente sovrapposti, quindi la non esclusione delle opere comporterebbe un errore nel calcolo dei volumi, errore che diventa rilevante quando si assegna al profilo la cella di rappresentatività. Occorre precisare che nel definire l'ampiezza della cella assegnata a ciascun profilo, utilizzata per estenderlo planimetricamente e passare quindi da m^3/m a m^3 , si è tenuto conto dell'omogeneità morfologica della costa e della presenza delle opere portuali e di difesa. In pratica, quindi, si è effettuata una operazione di affinamento rispetto alla semplice attribuzione della metà della distanza tra due profili successivi.

Si riportano le tabelle contenenti il calcolo dei volumi.

4.2.1 Risultati

Sezione 31L5							
Punto di Riferimento	Anno	X	Y	Z			
	2000	317235.290	4871262.410	1.44			
Limiti di calcolo	quota (m)	distanza progressiva dal punto di riferimento (m)					
	primo punto	6					
	0.0	67					
	-2.5	147					
	-8.0	1167					
Zona di calcolo	ANNO 2006	ANNO 2012	DV(12-06)	Larghezza influenza sezione			Volume Totale
	VOLUME (m ³ /m)	VOLUME (m ³ /m)	VOLUME (m ³ /m)	Destra	Sinistra	Totale	
				m	m	m	m ³
Punto di rif./quota 0	131	125	-6.00	0	310	310	-1860
quota 0 / -2.5	87	84	-3.00	0	310	310	-930
-2.5 / 8.0	3277	3147	-130.00	0	310	310	-40300
Punto di rif./ -2.5							-2790
Punto di rif./ -8.0							-43090

Tabella 5 - Calcolo volumi sezione 31L5

Sezione 32L5							
Punto di Riferimento	Anno	X	Y	Z			
	1984	317688.400	4871069.200	1.67			
Limiti di calcolo	quota (m)	distanza progressiva dal punto di riferimento (m)					
	primo punto	44					
	0.0	51					
	scogliera lato terra	166					
	scogliera lato mare	207					
	-8.0	1189					
Zona di calcolo	ANNO 2006	ANNO 2012	DV(12-06)	Larghezza influenza sezione			Volume Totale
	VOLUME (m ³ /m)	VOLUME (m ³ /m)	VOLUME (m ³ /m)	Destra	Sinistra	Totale	
				m	m	m	m ³
Punto di rif./quota 0	31	54	23.00	285	470	755	17365
quota 0 / s.l.t.	261	277	16.00	285	470	755	12080
s.l.m. / -8.0	4138	4181	43.00	285	470	755	32465
Punto di rif./ s.l.t.							29445
Punto di rif./ -8.0							61910

Tabella 6 - Calcolo volumi sezione 32L5

Sezione 33L5							
Punto di Riferimento	Anno	X	Y	Z			
	1984	318209.100	4870811.900	2.4			
Limiti di calcolo	quota (m)	distanza progressiva dal punto di riferimento (m)					
	primo punto	33					
	0.0	134					
	scogliera lato terra	166					
	scogliera lato mare	296					
	-8.0	1289					
Zona di calcolo	ANNO 2006	ANNO 2012	DV(12-06)	Larghezza influenza sezione			Volume Totale
	VOLUME (m ³ /m)	VOLUME (m ³ /m)	VOLUME (m ³ /m)	Destra	Sinistra	Totale	
				m	m	m	m ³
Punto di rif./quota 0	167	181	14.00	240	285	525	7350
quota 0 / s.l.t.	194	175	-19.00	240	285	525	-9975
s.l.m. / -8.0	4459	4319	-140.00	240	285	525	-73500
Punto di rif./ s.l.t.							-2625
Punto di rif./ -8.0							-76125

Tabella 7 - Calcolo volumi sezione 33L5

Sezione 34L5							
Punto di Riferimento	Anno	X	Y	Z			
	2000	318698.670	4870742.020	1.99			
Limiti di calcolo	quota (m)	distanza progressiva dal punto di riferimento (m)					
	primo punto	8					
	0.0	131					
	scogliera lato terra	148					
	scogliera lato mare	171					
	-8.0	1288					
Zona di calcolo	ANNO 2006	ANNO 2012	DV(12-06)	Larghezza influenza sezione			Volume Totale
	VOLUME	VOLUME	VOLUME	Destra	Sinistra	Totale	
	(m ³ /m)	(m ³ /m)	(m ³ /m)	m	m	m	m ³
Punto di rif./quota 0	216	228	12.00	250	240	490	5880
quota 0 / s.l.t.	216	133	-83.00	250	240	490	-40670
s.l.m. / -8.0	5062	4799	-263.00	250	240	490	-128870
Punto di rif./ s.l.t.							-34790
Punto di rif./ -8.0							-163660

Tabella 8 - Calcolo volumi sezione 34L5

Sezione 35L5							
Punto di Riferimento	Anno	X	Y	Z			
	1984	319198.400	4870742.500	1.73			
Limiti di calcolo	quota (m)	distanza progressiva dal punto di riferimento (m)					
	primo punto	26					
	0.0	100					
	scogliera lato terra	171					
	scogliera lato mare	210					
	-8.0	1270					
Zona di calcolo	ANNO 2006	ANNO 2012	DV(12-06)	Larghezza influenza sezione			Volume Totale
	VOLUME	VOLUME	VOLUME	Destra	Sinistra	Totale	
	(m ³ /m)	(m ³ /m)	(m ³ /m)	m	m	m	m ³
Punto di rif./quota 0	178	135	-43.00	130	250	380	-16340
quota 0 / s.l.t.	275	305	30.00	130	250	380	11400
s.l.m. / -8.0	5757	5868	111.00	130	250	380	42180
Punto di rif./ s.l.t.							-4940
Punto di rif./ -8.0							37240

Tabella 9 - Calcolo volumi sezione 35L5

Sezione 36L5							
Punto di Riferimento	Anno	X	Y	Z			
	2000	319577.770	4871068.900	1.71			
Limiti di calcolo	quota (m)	distanza progressiva dal punto di riferimento (m)					
	primo punto	23					
	-8.0	819					
Zona di calcolo	ANNO 2006	ANNO 2012	DV(12-06)	Larghezza influenza sezione			Volume Totale
	VOLUME	VOLUME	VOLUME	Destra	Sinistra	Totale	
	(m ³ /m)	(m ³ /m)	(m ³ /m)	m	m	m	m ³
Punto di rif./quota -8	2032	1885	-147.00	0	320	320	-47040

Tabella 10 - Calcolo volumi sezione 36L5

I risultati del calcolo dei volumi mostrano come negli ultimi 6 anni si abbia un bilancio complessivo negativo di 230765 m³; di questi 99190 m³ sono stati asportati per ripascimenti. Confrontando le tabelle si vede che, nonostante il bilancio complessivo sia negativo, il bilancio della sola spiaggia emersa è in forte accumulo soprattutto in virtù del fatto che la quasi totalità dei prelievi di sabbia è stata eseguita sulla spiaggia emersa, in particolare nella cella 3 (Tabella 4) a cui fanno riferimento le sezioni 32L5, 33L5, 34L5 e 35L5.

Guardando la sezione 36L5 si nota che, anche in questo caso, la perdita di materiale non si ha solo per erosione, ma anche per un dragaggio di sabbia di 17000 m³ eseguito nella primavera del 2007.

4.3 Batimetrie

Per eseguire un'analisi esaustiva del litorale è necessario costruire ed analizzare le batimetrie della zona di interesse così da visualizzarne l'andamento complessivo. In questo paragrafo si confronteranno le batimetrie relative alle due campagne di monitoraggio successive del 2012 e del 2006.

L'elaborazione dei dati, raccolti durante le due campagne, è stata possibile attraverso l'utilizzo di un programma di modellazione grafica: SURFER 9. Questo software permette di modellizzare il terreno tramite la definizione di una griglia a maglie quadrate, avendo come base un certo numero di dati spaziali rilevati. E' molto importante andare a definire i limiti spaziali della maglia, che devono essere uguali per tutti i grid successivi. Tali valori si ricavano analizzando i dati del rilievo, cercando per le coordinate X e Y i massimi e i minimi che consentano di inquadrare la zona di interesse. Altro punto fondamentale è la larghezza del lato della maglia, che può essere variabile ed è definito dall'operatore, in questo caso assunto pari a 10 m. Questo, significa che ogni 10 m il programma inserisce un punto nella griglia, determinandolo tramite interpolazione se non appartiene a quelli del rilievo. La definizione della maglia è quindi strettamente legata al metodo d'interpolazione scelto. In questo caso si è utilizzata la triangolazione con interpolazione lineare, che consiste nel determinare un nuovo punto tramite la media dei tre più vicini. Per evitare errori di bordo è stato necessario definire un contorno (blank) oltre il quale il software tagli la soluzione; in questo modo l'interpolazione avviene solo tra i punti interni e non si presentano gli effetti al contorno.

È stato inoltre possibile calcolare la mappa rappresentante la differenza tra le ,
Le quote (Figura 70), così da visualizzare le zone di erosione e deposito.
Affinché il programma possa creare la suddetta mappa, è necessario che le due
griglie di input (Figura 68 e Figura 69) siano perfettamente sovrapponibili;
questo significa che devono avere gli stessi limiti, lo stesso contorno, la stessa
scala e lo stesso numero di linee all'interno della griglia.
La scala scelta per la costruzione della batimetria è di 1:20000; riporto di seguito
le batimetrie del 2012, del 2006 e la loro differenza.

4.3.1 Risultati

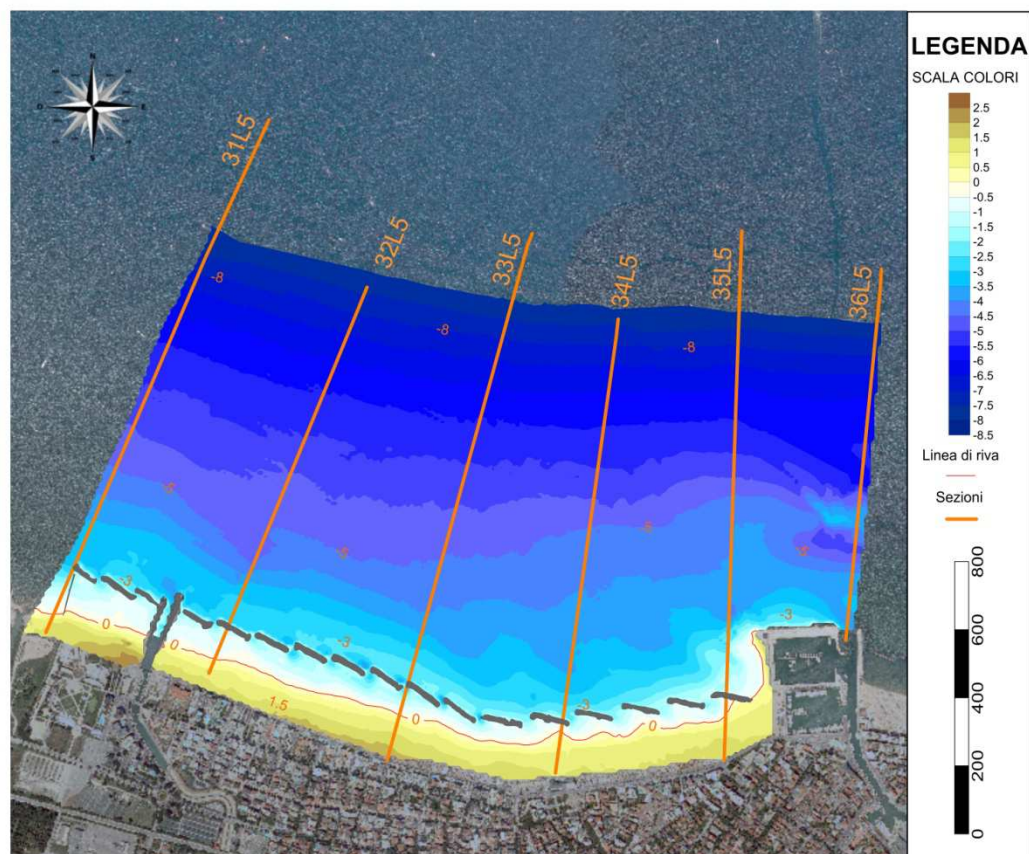


Figura 68 - batimetria anno 2012

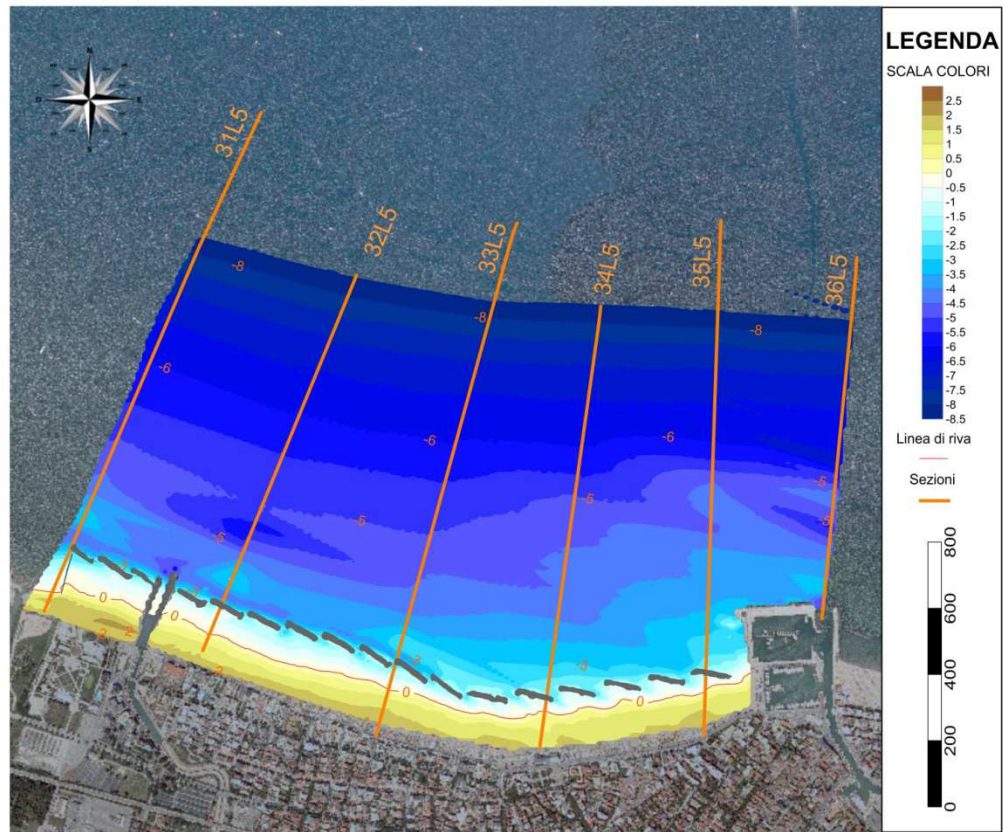


Figura 69 - batimetria anno 2006

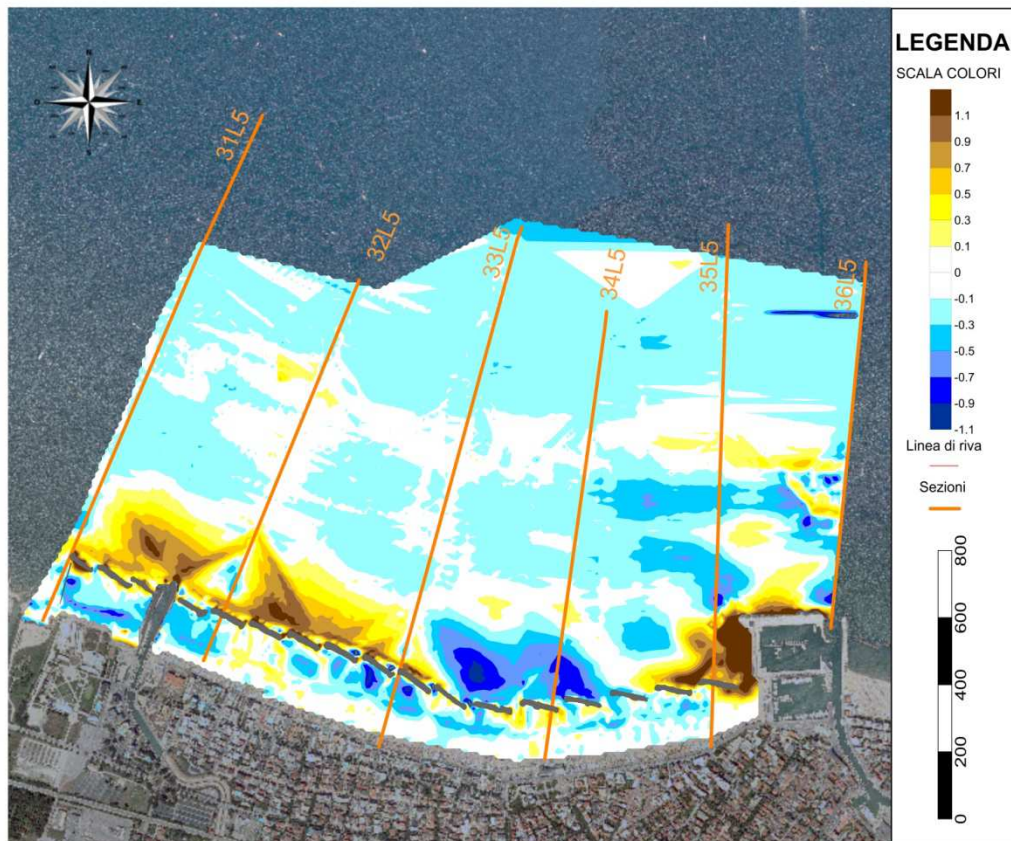


Figura 70 - Differenza batimetrie 2012-2006

Le batimetrie del 2012 e del 2006 evidenziano come le scogliere vadano a formare delle buche nei varchi e salienti tra la sezione 34L5 e la sezione 35L5. Si nota come lo varchi più stretti vadano ad incanalare le correnti in questi punti causando un forte trasporto. La zona ad est è caratterizzata invece da barriere più vicine alla costa che vanno appunto a formare i salienti.

Le foto aeree in sfondo sono riferite all'anno 2012, quindi in Figura 69 si deve tenere in considerazione che la darsena non è presente, in quanto è stata costruita nel 2007.

Le modifiche negli ultimi anni che si sono verificate sono principalmente causate dalla presenza della nuova opera; dal confronto delle tre figure si vede infatti come questa abbia schermato la zona adiacente causando la formazione di un nuovo tratto di spiaggia.

La darsena ha inoltre causato l'insabbiamento della prima scogliera rendendola parte della spiaggia (Figura 68).

L'erosione evidenziata a est della foce del fiume Ventena è da attribuire al fatto che nel 2010 è stata presa la decisione di abbassare la scogliera fino al livello del mare per favorire il ricircolo, ma la differenza di gradiente idraulico con la zona antistante, ha portato ad una forte erosione; a seguito di questo la barriera è stata ripristinata ed è stato eseguito un piccolo rinascimento di 4000 m^3 (Tabella 4) che ha in parte ripristinato la situazione.

In Figura 70 a largo delle barriere si nota una zona di erosione ed una di accumulo; per valutare queste zone è necessario conoscere gli eventi meteo marini che si sono verificati nei giorni antecedenti i due rilievi. In questo caso sono state sicuramente rilevanti la differente angolatura della costa nelle due zone e la posizione delle scogliere rispetto a riva, che in un caso sono parallele a riva e con elevazione maggiore, nell'altro sono oblique e più basse. Nella zona in cui le barriere hanno una maggiore elevazione l'acqua non tracima e deposita sedimenti a largo.

Complessivamente si può affermare che la spiaggia di Cattolica è in equilibrio con accumulo nella zona protetta dalle scogliere.

4.4 Ipotesi di Riqualificazione barriere emerse

Dal calcolo dei volumi e dalle batimetrie non si ha nessuna indicazione sulla qualità delle acque. Questo aspetto risulta fondamentale in una spiaggia fortemente antropizzata come quella di Cattolica.

In particolare le zone che presentano maggiore inquinamento si configurano nelle zone che presentano sovrapposizione ai varchi delle barriere emerse, che forniscono un ulteriore ostacolo al ricircolo.

Nella zona di studio il problema si presenta soprattutto nella zona compresa tra la foce del fiume Conca e la foce del fiume Ventena (Figura 71 - Tratti compreso tra foce Ventena e foce Conca. In questa zona infatti l'apertura del canale alla foce del Ventena causa il deposito delle acque scaricate nella spiaggia adiacente che non riesce a smaltire i sedimenti fini ed inquinanti.

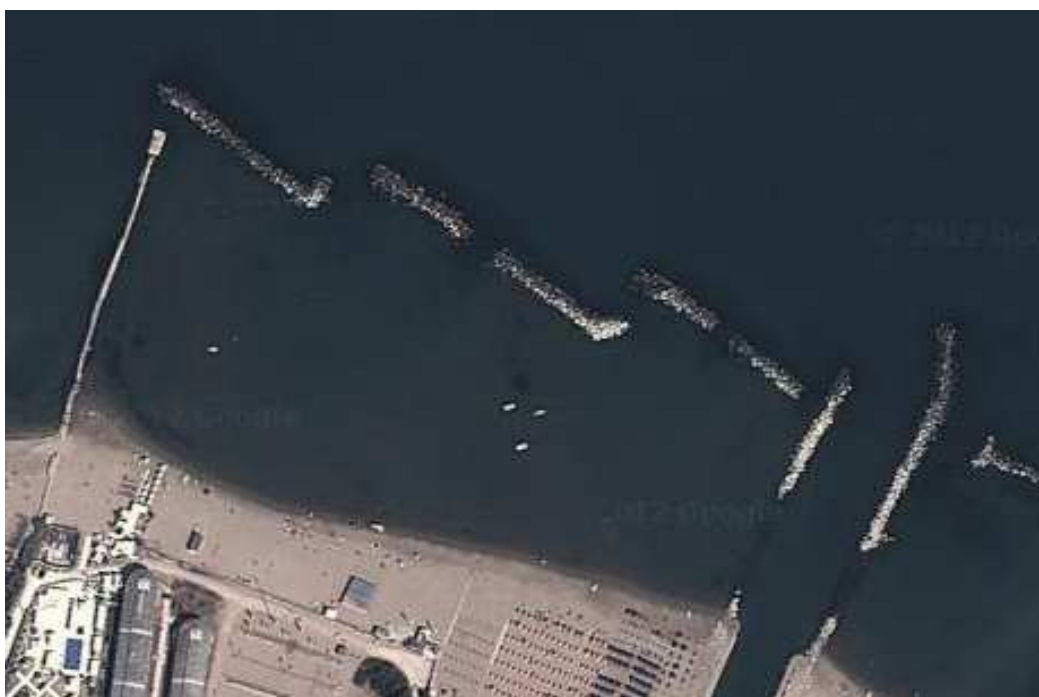


Figura 71 - Tratti compreso tra foce Ventena e foce Conca

Si propone quindi una soluzione di protezione della costa differente da quella attuale, che consiste principalmente nel trasformare le barriere da emerse a sommerse.

L'idea è quella di scapitozzare le scogliere rimuovendo due massi così da avere una sommergenza di -1 m. Il secondo passo consiste nella costruzione di isolotti cilindrici ai lati delle scogliere (raggio 6 m), portandoli ad emergere di 1,5 m sul

livello del mare. Questi isolotti offrono una duplice funzione: creare diffrazione, quindi dissipazione di energia ondosa, e possono essere anche adibiti a scopo ricreativo. Per garantire la stabilità dell'opera si è pensato di costruire una berma di protezione al piede con larghezza 4 m e sommergenza -2 m; inoltre, per garantire ricircolo, sarà necessario modificare i varchi portandoli ad una sommergenza di -2m ed una larghezza in cresta di 20 m.

Una volta modificata la barriera si viene a creare una differenza di set-up con la zona a est del Ventena. Per evitare la formazione di forti correnti erosive è necessario il ripristino del pennello separando così le due zone (Figura 72).

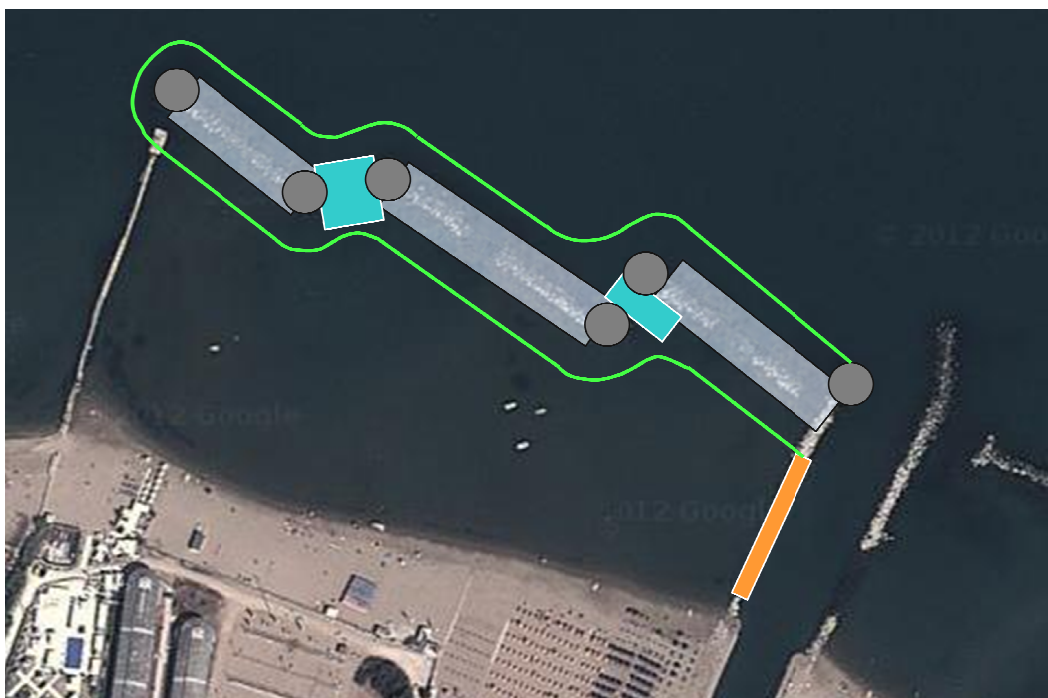


Figura 72 - Riquilificazione barriere emerse

- scapitozzamento delle barriere emerse (-2 massa), sommergenza (S) -1.0 m, larghezza in cresta (B) 15 m
- creazione di 'isolotti' (+1 massa sulla barriera), raggio 6 m, emergenza +1.5 m
- costruzione di varchi, sommergenza -2.0 m, larghezza in cresta 20 m
- costruzione di protezione al piede, sommergenza e larghezza berna rispettivamente -2.0 m, 4 m
- ripristino pennello

È plausibile pensare di estendere questa soluzione alle scogliere adiacenti, in modo da migliorare la qualità paesaggistica e delle acque lungo tutto la spiaggia.

CONCLUSIONI

In questo elaborato è stata condotta un'analisi di lungo periodo della spiaggia di Cattolica. L'attenzione è stata rivolta verso le tecniche di monitoraggio utilizzate ed al trasporto solido conseguente alla presenza di barriere emerse presenti nel sito di studio.

La tesi è stata svolta in collaborazione con ARPA che ha fornito i dati rilevati durante la V campagna di monitoraggio (2012) del litorale Emiliano-Romagnolo. L'elaborazione dei dati è avvenuta tramite i software ArcGIS 10 e Grapher 8 che hanno permesso di estrarre i profili, visualizzarli su grafico e calcolare i volumi di erosione e deposito; tramite il software di modellazione grafica Surfer 9 è stato possibile calcolare le batimetrie.

Grazie all'elaborazione di questi dati è stato possibile eseguire un confronto con la situazione del litorale degli anni 1984, 1993, 2000 e 2006.

In particolare si è inquadrata la situazione del litorale tra il 1984 ed il 2006, per poi avere un confronto diretto tra la situazione del 2006 e quella attuale del 2012. I dati degli interventi sulla spiaggia di Cattolica dal 2006 al 2012 sono stati forniti dalla Provincia di Rimini. Grazie a questi dati è stato possibile un'indicazione più precisa sulle zone di erosione e deposito causate dal moto ondoso.

Dal calcolo dei volumi e dalle batimetrie risulta che la spiaggia è complessivamente in equilibrio, con un leggero accumulo nella zona protetta dalle scogliere. L'evoluzione della spiaggia è dovuta per lo più da interventi antropici quali la costruzione della nuova darsena. Questa ha generato un forte accumulo nella zona protetta con conseguente formazione di un nuovo tratto di spiaggia. Sempre nella stessa zona, l'opera ha causato l'insabbiamento della prima scogliera di Cattolica rendendola inefficace. Si sono verificate ulteriori movimentazioni di sedimenti dalla zona centrale di Cattolica a largo delle scogliere, verso la foce del fiume Ventena.

Complessivamente si conclude che la spiaggia di Cattolica è in equilibrio, presenta un leggero accumulo nella zona protetta dalle scogliere.

È stata inoltre proposta un'ipotesi di riqualificazione delle ultime tre barriere emerse del litorale di Cattolica, allo scopo di migliorare la qualità delle acque di balneazione, che presentano in quel tratto un elevato tasso di inquinamento.

RINGRAZIAMENTI

Con questa tesi si conclude un percorso durato per me sette meravigliosi anni, durante i quali si sono susseguite innumerevoli e irripetibili emozioni. Il raggiungimento di questo obiettivo è stato maturato attraverso un processo di crescita intellettuale e morale, senza dimenticare l'infinito divertimento e 'Bagar' che fanno di me la persona che sono oggi. Per tutto questo RINGRAZIO:

La mia famiglia per avermi insegnato i valori senza i quali non avrei mai potuto arrivare fino a qui, per essermi stata vicina in ogni momento, per avermi sempre appoggiato nelle decisioni importanti non facendomi mai mancare NIENTE, e per mille altre cose grazie alla Ma, al Ba, al Nonno e a Marco.

Claudia per avermi regalato due anni di felicità e di certezze; per essere sempre stata al mio fianco in ogni situazione, fedele e comprensiva anche nei momenti più complicati; per tutto il resto le parole non bastano a descrivere l'affetto che provo per te.

Cale per tutte le avventure che abbiamo passato insieme da venti anni e più a questa parte, diventando per me un secondo fratello.

Eva per essere stata una valida amica fin dall'infanzia, e per avermi sempre trasmesso la consapevolezza di poter contare sulla nostra amicizia indipendentemente da tutto il resto.

Gaudo, Nico, Pil, Massi, Sarto, Tomma, Barto, Matt, il Violo, la Romi, la Cri e l'Eli per essere stati gli amici leali che ogni persona dovrebbe avere, dandomi la certezza della vostra presenza e per avermi regalato anni di grande divertimento, Grazie guys.

Riky e Endriu Per avermi introdotto alla vita universitaria rappresentando per me dei modelli da seguire sia nello studio che nella vita.

Il Gallo, il Cuto, la Giulia, il Magna, Proca, Ste, Enri e Albi per essere stai i migliori compagni di università che potessi desiderare, regalandomi emozioni indescrivibili. Non le dimenticherò mai!

Dru, Puccio e Marti per aver istituito il Club 13 del quale sono onorato di far parte... Anche se non abbiamo vissuto sotto lo stesso tetto è come se lo fosse stato.

Ravi, Sebi, Filips, Agu e Vagno per aver passato insieme dei bellissimi momenti condividendo tante situazioni significative della mia vita.

I ragazzi dell'Erasmus in particolare *Kristian, Philippe e Luca* per avermi regalato cinque mesi speciali ed indimenticabili; senza di voi non sarebbe stata la stessa cosa.

La Prof.ssa Barbara Zanuttigh che insieme ai correlatori *Caterina Zoppi, Nunzio De Nigris e Mentino Preti*, mi hanno aiutato nella redazione di questa tesi.

Ringrazio inoltre tutte le altre persone con cui ho condiviso esperienze significative in questi sette anni, che non ho nominato ma che comunque mi hanno regalato qualcosa di bello.

BIBLIOGRAFIA

- Preti M., De Nigris N., Morelli M., Monti M., Bonsignore F., Aguzzi M., 2008.
“Stato del litorale emiliano-romagnolo all’anno 2007 e piano decennale di gestione” ARPA
- Carli S., Cipriani L., Bresci D., Danese C., Iannotta P., Pranzini E., Rossi L.,
Wetzel L., 2004. *“Tecniche di monitoraggio dell’evoluzione delle spiagge”*
http://www.rete.toscana.it/sett/pta/stato_ambiente/erosione_costiera/
- Basta I., Zanuttigh B., Aguzzi M., De Nigris N., Morelli M., Preti M., 2010. *“evoluzione morfologica indotta da un sistema di difesa composito Misano Adriatico (RN)”*
- Monti M., Zanuttigh B., Barbarella M., Preti M., De Nigris N., 2008. *“Analisi dell’evoluzione morfologica indotta ad Igea Marina (RN) da opere a cresta bassa mediante rilievi topo batimetrici ed aviotrasportati”*.