



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN  
"SCIENZE DELLA TERRA"

CICLO XXIV

COORDINATORE Prof. Luigi Beccaluva

**Performance ed analisi della morfodinamica a seguito di  
un ripascimento sommerso (*feeder berm*) e di un reef  
artificiale (*Tecnoreef*) realizzati per la mitigazione dei  
fenomeni erosivi del litorale di Punta Marina  
(Emilia-Romagna, Italia)**

Settore Scientifico Disciplinare GEO/04

**Dottoranda**

Dott.ssa Utizi Kizzi

**Tutore**

Prof. Simeoni Umberto

**Co - Tutore**

Dott.ssa Soldati Michela

Anni 2009/2011



*A Giampaolo*



# **INDICE**

<b>1</b>	<b><u>INTRODUZIONE</u></b>	<b>1</b>
1.1	SCOPO DELLA RICERCA	3
<b>2</b>	<b><u>I RIPASCIMENTI ARTIFICIALI</u></b>	<b>5</b>
2.1	RICOSTRUZIONE DELLA DUNA	9
2.2	RIPASCIMENTO DELLA SPIAGGIA EMERSA E INTERTIDALE	11
2.3	RIPASCIMENTO SOMMERSO	13
2.3.1	ASPETTI GENERALI PER LA PROGETTAZIONE DI RIPASCIMENTI SOMMERSI	15
2.3.2	ESEMPI DI REALIZZAZIONE DI RIPASCIMENTI SOMMERSI	17
<b>3</b>	<b><u>LE BARRE SOMMERSE</u></b>	<b>23</b>
3.1	GENESI	23
3.2	MORFOLOGIA	27
3.3	DINAMICA	33
<b>4</b>	<b><u>EVOLUZIONE MORFOLOGICA RECENTE DEL LITORALE EMILIANO-ROMAGNOLO</u></b>	<b>37</b>
4.1	IL CLIMA METEO-MARINO	37
4.2	L'EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA	40
4.2.1	STRUMENTI E METODI	40
4.2.2	ANALISI DELLA VARIAZIONE DELLA LINEA DI RIVA DAL 1943 AL 2000	43
4.3	L'EVOLUZIONE DEI FONDALI	52
4.3.1	STRUMENTI E METODI	53
4.3.1	LE BARRE SOMMERSE IN EMILIA ROMAGNA	55
4.3.1.1	Analisi dei parametri morfometrici delle barre	67
4.3.2	ANALISI DELLA VARIAZIONE DELLA PROFONDITÀ DEI FONDALI	74
4.4	CONSIDERAZIONI	77
<b>5</b>	<b><u>LA DIFESA DELLA COSTA CON STRUTTURE RIGIDE</u></b>	<b>85</b>

<b>5.1</b>	<b>I REEF ARTIFICIALI</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO</b>	<b>93</b>
<b>6.1</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO – STRUTTURALE</b>	<b>94</b>
6.1.1	STRATIGRAFIA DEL TERRITORIO IN ESAME	97
<b>6.2</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO</b>	<b>102</b>
6.2.1	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO DEL TERRITORIO IN ESAME	103
<b>6.3</b>	<b>LA DERIVA LITORANEA NEL TRATTO DI STUDIO</b>	<b>105</b>
<b>6.4</b>	<b>LA SUBSIDENZA NEL TRATTO DI STUDIO</b>	<b>106</b>
<b>6.5</b>	<b>L'APPORTO SOLIDO FLUVIALE</b>	<b>107</b>
<b>6.6</b>	<b>L'ASSETTO MORFOLOGICO DEL LITORALE IN ESAME</b>	<b>109</b>
<b>6.7</b>	<b>EVOLUZIONE MORFOLOGICA RECENTE ED INTERVENTI DI DIFESA</b>	<b>114</b>
6.7.1	ANALISI DI DETTAGLIO DELL'EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA	114
6.7.2	EVOLUZIONE DELLE BARRE SOMMERSE SUI FONDALI DI PUNTA MARINA	119
<b>6.8</b>	<b>L'INTERVENTO INNOVATIVO ESEGUITO NELLA PRIMAVERA DEL 2010</b>	<b>126</b>
6.8.1	CONSIDERAZIONI SUL CLIMA MARINO DURANTE LA REALIZZAZIONE DELL'INTERVENTO	133
<b>7</b>	<b>MATERIALI E METODI</b>	<b>135</b>
<b>7.1</b>	<b>RILIEVI TOPOGRAFICI E BATIMETRICI</b>	<b>135</b>
7.1.1	RILIEVI BATIMETRICI CON ECOSCANDAGLIO MULTI-BEAM (MBES)	138
<b>7.2</b>	<b>CAMPIONAMENTI SEDIMENTOLOGICI ED ANALISI GRANULOMETRICHE</b>	<b>140</b>
<b>7.3</b>	<b>CLIMA METEO-MARINO</b>	<b>142</b>
<b>7.4</b>	<b>ELABORAZIONE ED ANALISI DEI DATI</b>	<b>142</b>
<b>8</b>	<b>RISULTATI</b>	<b>149</b>
<b>8.1</b>	<b>ANALISI TOPO-BATIMETRICA</b>	<b>149</b>
8.1.1	EVOLUZIONE DELLA SPIAGGIA EMERSA	149
8.1.2	EVOLUZIONE DELLA SPIAGGIA SOMMERSA	163
8.1.2.1	Analisi di dettaglio dell'evoluzione della spiaggia sommersa	174
8.1.2.2	Analisi morfologiche di dettaglio del reef artificiale	215
<b>8.2</b>	<b>ANALISI SEDIMENTOLOGICA</b>	<b>219</b>
8.2.1	ANALISI TESSITURALE DEI CAMPIONI PRELEVATI IN DICEMBRE 2010	219

8.2.2	ANALISI TESSITURALE DEI CAMPIONI PRELEVATI IN MAGGIO 2011	224
8.2.2.1	Confronto tessiturale tra Dicembre 2010 e Maggio 2011	226
8.2.3	ANALISI TESSITURALE DEI CAMPIONI PRELEVATI IN OTTOBRE 2012	229
8.2.3.1	Confronto tessiturale tra Maggio 2011 e Ottobre 2012	234
8.2.3.2	Confronto tessiturale tra Dicembre 2010 ed Ottobre 2012	236
<b>8.3</b>	<b>ANALISI DELLE FORZANTI METEO-MARINE</b>	<b>239</b>

**9   DISCUSSIONE 249**

---

**10   CONCLUSIONI E PROPOSITI DI RICERCA 269**

---

**11   BIBLIOGRAFIA 277**

---

**12   SITOGRAFIA 299**

---

**APPENDICE A   Carte Batimetriche**

**APPENDICE B   Elaborazione dei profili batimetrici**

**APPENDICE C   Parametri tessiturali dei campioni di sedimento**



## 1 Introduzione

---

La costa è una stretta fascia di terra in costante cambiamento soggetta a processi geomorfici sia continentali che marini. La linea di riva dipende giornalmente e stagionalmente dall'azione del mare (onde, maree, correnti) e del vento, da processi biologici e da processi fisici continentali come la dinamica fluviale e di versante, ma anche da fattori locali come la subsidenza o fattori globali come le variazioni eustatiche.

La naturale dinamica di questo ambiente è stata spesso alterata per salvaguardare gli interessi e le attività dell'uomo.

Il territorio costiero negli ultimi decenni è diventato un luogo in cui si concentrano e si sovrappongono, in maniera spesso conflittuale, numerosi interessi socio-economici dettati in primo luogo dalla concentrazione della popolazione nei territori costieri. L'Emilia-Romagna, con i suoi 130 km circa di costa bassa e sabbiosa, ha richiamato nel corso del '900 un enorme afflusso turistico, con oltre 40 milioni di presenze annuali, per un bilancio economico di oltre 6 miliardi di euro (Preti, 2002). Il veloce sviluppo socio-economico ha portato dunque ad una crescente antropizzazione del territorio e, conseguentemente, ad una sempre maggior alterazione delle naturali caratteristiche della costa emiliano-romagnola, con effetti notevolmente dannosi.

L'uso e l'occupazione sconosciuti del territorio costiero operati dall'uomo negli ultimi decenni (urbanizzazione, costruzione di stabilimenti balneari, passeggiate a mare, parcheggi, smantellamento degli apparati dunali, messa in opera di moli portuali, estrazione di acque metanifere) hanno accentuato i fenomeni erosivi e modificato la dinamica idrosedimentaria, mettendo a rischio infrastrutture ed abitati e compromesso l'esistenza di intere aree di interesse comunitario.

A tutto ciò va aggiunto il problema dettato dall'accelerazione recente del sollevamento del livello marino, che potrebbe essere ancora più rilevante, con effetti devastanti sui sistemi costieri. Il rapporto prodotto dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) nel 2007 individua scenari preoccupanti. Si stima infatti che l'innalzamento marino del prossimo secolo, per sole cause climatiche, potrebbe

superare il mezzo metro rispetto al livello attuale, comportando conseguenze gravi sugli ecosistemi e sui territori aventi quote prossime o inferiori al livello medio marino, come l'arretramento della linea di riva, la sommersione dell'entroterra dovuta ad eventi di tempesta ed acqua alta, l'intrusione d'acque salate nelle falde acquifere, ecc.

Il crescente interesse economico prodotto dal turismo balneare e la necessità di proteggere tali spazi ha incentivato lo sviluppo di numerosi interventi a mare. A partire dal 1930 sul litorale regionale sono state collocate diverse tipologie di opere di difesa dall'erosione. Considerando che alcune, soprattutto le più vecchie, sono state distrutte dal mare o sostituite da altre e che vi sono tratti costieri in cui diverse opere si sovrappongono (ad esempio opere longitudinali e trasversali), all'anno 2007 ben 74 km dei 130 km di litorale risultano protetti da opere "rigide". A ciò vanno sommati i diversi chilometri di argini, costruiti nell'entroterra per difendere le vaste aree depresse da ingressioni marine, le armature delle foci fluviali ed i moli portuali, i quali aumentano la lunghezza dei tratti difesi fino a 150 km (Arpa, 2009).

Le opere "rigide" hanno ulteriormente modificato la dinamica idro-sedimentaria, perché hanno frammentato la costa e modificato il trasporto dei sedimenti e la circolazione delle masse d'acqua.



Fig. 1.1 - Foto aerea della spiaggia di Cesenatico (FC) (da <http://www.emiliaromagnaturismo.it/>).

La consapevolezza che la spiaggia costituisce la prima "barriera" e la prima difesa dell'entroterra dall'azione distruttrice del mare evidenzia la necessità di una sempre più approfondita conoscenza dei processi costieri.

### 1.1 Scopo della ricerca

---

La necessità di proteggere e preservare il litorale e l'ecosistema, assieme alla volontà di ricercare nuove tipologie di intervento meno impattanti, ha spinto la ricerca verso la sperimentazione di sempre nuove metodologie difensive. Dalla seconda metà degli anni '80 in ambito regionale il ripascimento della spiaggia emersa è diventato sempre più usuale, inizialmente accompagnato da opere rigide di contenimento, come barriere in sacchi, e poi privo di ogni struttura.

Tale intervento di tipo "morbido", in funzione della sua natura, risponde in modo dinamico alle forzanti meteo-marine, non comportando alcun tipo di effetto negativo sui litorali adiacenti. Sebbene il suo destino sia quello di essere via via eroso dal mare, esso viene considerato un intervento riuscito quando le fluttuazioni stagionali della linea di costa rimangono comunque entro certi limiti, in funzione della durata stabilita in fase progettuale.

Alla luce di ciò, e con la consapevolezza dei limiti intrinseci del ripascimento stesso, in termini di compatibilità sedimentaria e disponibilità di sedimento in volumi adeguati, l'attenzione si è spostata su altri tipi di ripascimento, come quelli sommersi.

In Nord Europa, come in America o in Australia, questa tecnica è stata già applicata e studiata, con risultati positivi per la difesa costiera.

E' da tenere in considerazione, però, che i litorali dove è stato realizzato il ripascimento sommerso siano caratterizzati da diverse condizioni al contorno rispetto a quelle peculiari dei litorali adriatici, in termini di idrodinamica, assetto morfologico di spiaggia emersa e fondali e caratteristiche sedimentarie.

Inoltre si sottolinea che in letteratura, le esperienze di ripascimento sommerso si riferiscono sempre a fondali in cui sono presenti sistemi di barre sommerse, di cui si conoscono approfonditamente dinamiche e caratteristiche. Questo sembra essere

importante nella progettazione del ripascimento, in particolare nella scelta della posizione e delle caratteristiche morfologiche del versamento.

Diversi autori considerano le barre naturali sommerse una perturbazione della linearità del profilo sommerso. La loro posizione, forma e dimensione e la loro dinamica sono fortemente dipendenti dalla granulometria del sedimento, dalla pendenza dei fondali e dalle caratteristiche ondometriche locali.

Proprio alla luce di ciò, è evidente come la loro natura sia estremamente variabile in relazione alle variazioni delle condizioni al contorno. Va ricordato che le barre influenzano in maniera determinante il regime idrodinamico e sedimentario non solo della zona di surf, ma di tutto il sistema costiero ad essa connesso (Wijnberg & Terwindt, 1995; Plant et al., 2001).

Le barre e la loro dinamica, assieme alle forzanti del moto ondoso, sono determinanti nell'evoluzione della linea di riva, come dimostrato da Guillen et al. (1999) per la costa olandese. La comprensione delle dinamiche delle barre e di come il loro comportamento influenzi quello della spiaggia emersa è stato argomento di studi e ricerche internazionali da decenni. Si citano a tal riguardo i lavori di Wright & Short (1984), Simeoni (1989), Lippmann & Holman (1990), Dal Cin & Simeoni (1994), Hoekstra et al. (1996), Shand et al. (1999), Ruessink and Terwindt (2000), ecc.

Assieme agli interventi "morbidi", nell'ambito della difesa costiera, attualmente si sta assistendo alla messa in opera di strutture permeabili, create principalmente per il ripopolamento ittico e della flora dei fondali marini. Le loro caratteristiche costruttive sono fortemente variegate, ma in letteratura informazioni sulla loro efficacia ed efficienza in termini di protezione della costa dall'azione erosiva del mare sono piuttosto scarse. Infatti ben poco si conosce degli effetti sulla dinamica idro-sedimentaria indotta dalla loro presenza e di conseguenza sui reali benefici che possono apportare alla spiaggia.

Per tutte queste ragioni è stato condotto uno studio su un sito campione, dov'è stato realizzato un ripascimento sommerso con caratteristiche morfologiche simili ad una barra naturale (*feeder berm*) e messa in opera una struttura permeabile intelaiata (*Tecnoreef*). Tale lavoro ha dunque lo scopo di valutare la *performance* ed analizzare la morfodinamica del tratto costiero oggetto del duplice intervento.

## 2 I ripascimenti artificiali

---

Negli ultimi decenni, a seguito di alcuni interventi pionieristici effettuati in alcune spiagge Europee, si è finalmente compresa la necessità e l'importanza di un approccio che tenga in considerazione una tutela del territorio nell'ottica di uno sviluppo sostenibile delle aree costiere; sono iniziate a comparire le prime tecniche di "interventi morbidi" (*soft solutions*) a protezione della costa (Hamm et al., 2002). Questo approccio di tipo "morbido" è nato con la volontà di intervenire sulla spiaggia con sistemi di difesa che avessero un minor impatto ambientale ma che potessero, allo stesso modo, proteggere la costa dall'erosione. Le prime applicazioni hanno visto l'associazione di versamenti di materiale e messa in opera di strutture rigide come pennelli e/o barriere in massi o in sacchi riempiti di sabbia, con la funzione di contenimento del materiale sabbioso versato. Tali combinazioni di interventi vengono chiamati ripascimenti protetti.

Il ripascimento, inteso come il versamento di sedimento su una spiaggia, ha l'intento di ricreare una spiaggia che, nonostante le naturali fluttuazioni stagionali, mantenga una dimensione minima accettabile in funzione delle sue peculiarità. Gli scopi del loro impiego possono essere diversi: migliorare la stabilità della spiaggia, proteggere l'ecosistema costiero, proteggere le aree interne da fenomeni di inondazione, aumentare l'ampiezza della spiaggia o mantenere un'ampiezza tale da soddisfare le necessità delle attività turistiche. Tale metodologia ha avuto un grande successo poiché ripristinando un ambiente simile a quello naturale, non altera la circolazione delle correnti marine e contribuisce in maniera positiva al bilancio sedimentario del tratto costiero.

I primi interventi di ripascimento furono effettuati nelle coste del Portogallo, Germania e Regno Unito negli anni '50, seguiti da Francia, Belgio e Italia negli anni '60, dall'Olanda e Danimarca negli anni '70 e Spagna all'inizio degli anni '80 (Hamm et al., 2002). Attualmente il ripascimento periodico della spiaggia è una metodologia diffusamente accettata ed applicata per la protezione della costa e ricreazione degli ambienti, per far fronte alle emergenze causate dalle mareggiate (nel breve termine) o

per contrastare la perdita di ecosistemi e spazi a seguito di subsidenza e risalita del livello marino (Dean, 2002; Hanson et al., 2002).

Esistono numerosi manuali che guidano il progettista per la realizzazione del ripascimento (NRC, 199; CUR, 1997; NOURTEC, 1997, Dean, 2002; USACE, 2003). Tra i fattori fondamentali per una corretta progettazione vi sono le caratteristiche del materiale di prestito. E' infatti richiesto un sedimento compatibile con quello nativo dal punto di vista tessiturale ma anche mineralogico, al fine di essere in equilibrio idrodinamico con il sistema (AA.VV., 2007). Oltre alla qualità del sedimento (incontaminato) e ad un quantitativo minimo indispensabile affinché resista per un determinato periodo, è richiesta una granulometria idonea all'area in cui dovrà essere versato (Krumbein & James, 1965; Pranzini et al., 1999). In generale il sedimento dovrebbe essere comparabile o leggermente più grossolano del sedimento nativo, in modo tale da avere un comportamento simile a quello naturale, e con un modesto contenuto della frazione fine, poiché il materiale sottile tende ad essere velocemente asportato dall'azione del mare (USACE, 2003; AA.VV., 2007).

La messa in sospensione del materiale fine comporta purtroppo alcuni effetti negativi, seppur di breve durata: oltre ad una perdita di parte del materiale versato, si viene a creare un intorbidamento delle acque con serie ripercussioni sull'ecologia del paraggio e, quindi, sull'habitat marino e costiero.

I sedimenti di prestito possono avere diverse origini, a partire dai depositi relitti di sabbie off-shore (a profondità maggiori della profondità di chiusura; Hallermier, 1981) in modo da non influire negativamente sul budget sedimentario del litorale, dai tratti litoranei in accumulo all'interno del sistema litorale stesso (a ridosso di opere e strutture rigide) mediante pratiche di *bypass*, da cave terrestri o da accumuli a ridosso degli sbarramenti fluviali.

Altro fattore importante è la scelta della posizione in cui effettuare il versamento. Sono infatti possibili diverse configurazioni di ripascimento lungo il profilo trasversale alla costa; ogni soluzione offre peculiari vantaggi ed è funzionale allo scopo perseguito (NRC, 1995). Di seguito si riporta uno schema delle caratteristiche di alcune tipologie di ripascimento (Tab. 2.1, Fig. 2.1).

Di per sé il ripascimento non determina particolari impatti negativi, se trascuriamo gli effetti dovuti ad una errata scelta del materiale da impiegare. Anzi, l'immissione nel sistema di un certo quantitativo di materiale dà comunque benefici al budget sedimentario del tratto costiero in oggetto. In ogni caso i ripascimenti non hanno una lunga durata e necessitano di interventi di manutenzione periodici.

posizione versamento	descrizione	caratteristiche
<b>Duna</b>	fianco della duna; piede della duna; limite superiore della spiaggia emersa	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Protezione dell'entroterra da eventi di tempesta</li> <li>▪ Non viene aumentata l'ampiezza della spiaggia</li> <li>▪ Grandi perdite iniziali per attacco delle onde</li> <li>▪ Creazione di barre a largo con il materiale eroso dalla zona di ripascimento, che vanno a ridurre l'energia delle onde</li> <li>▪ Ridistribuzione del materiale lungo tutto il profilo</li> </ul>
<b>Spiaggia emersa e intertidale</b>	spiaggia emersa; spiaggia intertidale (beach face)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Immediato aumento della superficie per attività antropiche</li> <li>▪ Ridistribuzione della sabbia lungo l'intero profilo fino ad una configurazione stabile ad opera delle onde</li> <li>▪ Perdita di una parte del sedimento versato sulla spiaggia emersa per azione modellatrice delle onde</li> <li>▪ Protezione da eventi di tempesta</li> </ul>
<b>Spiaggia sommersa</b>	truogolo cresta della barra fianco mare della barra esterna	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Creazione di una difesa naturale in grado di dissipare parte dell'energia dell'onda</li> <li>▪ Ridistribuzione naturale del materiale di ripascimento lungo il profilo sommerso ad opera delle onde</li> </ul>

Tab. 2.1 - Tipologie di ripascimento delle spiagge.

Di per sé il ripascimento non determina impatti negativi, se trascuriamo gli effetti sopracitati dovuti ad una errata scelta del materiale da impiegare. Anzi, l'immissione nel sistema di un certo quantitativo di materiale dà comunque benefici al budget sedimentario dell'unità morfologica in oggetto. In ogni caso però i ripascimenti non hanno una lunga durata e necessitano di interventi di manutenzione periodici.

Per tentare di prolungare il tempo di ricarica assieme al ripascimento viene spesso accompagnato dalla messa in opera di altre tipologie di difesa, con lo scopo di smorzare l'energia del moto ondoso e garantire un minor potere erosivo del mare. Tale duplice intervento viene definito "ripascimento controllato", se al ripascimento della spiaggia viene associato un ripascimento sommerso, oppure "ripascimento protetto" se include la realizzazione di opere rigide come pennelli ed opere foranee in grado di rallentare la corrente lungocosta nel primo caso o smorzare l'energia delle onde

incidenti nel secondo (Aminti e Verzoni, 1993; Caputo, 1993; Silva e Di Girolamo, 1993, NRC, 1995; Benassai et al., 1997, Kuang et al., 2010).

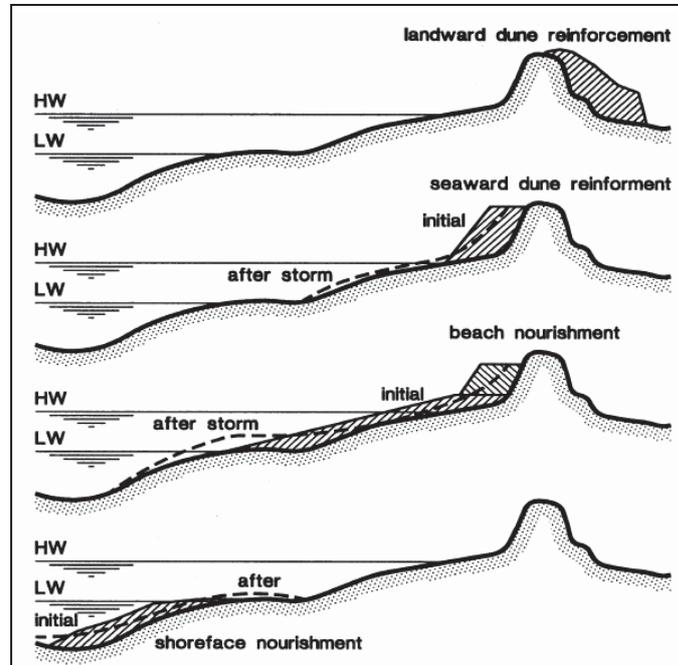


Fig. 2.1 - Quattro tipologie di ripascimento (l'area in tratteggio evidenzia la zona di versamento); dall'alto: fianco terra e fianco mare della duna, sulla spiaggia emersa ed infine sulla spiaggia sommersa (da Van Rijn and Walstra, 2004).

Lamberti e Mancinelli (1996) scrissero che, per quanto riguarda i loro studi di casi italiani, le condizioni migliori al fine della difesa della costa fossero i ripascimenti della spiaggia protetti da strutture rigide sommerse. Ma, attualmente, uno dei maggiori problemi delle strutture sommerse sono le correnti di *setup* che si generano a causa dell'innalzamento del livello marino nella zona protetta dalla barriera stessa: questo surplus d'acqua intrappolata sotto costa genera a sua volta delle correnti di uscita lungocosta che puntualmente incrementando la sua erosione della costa (Dean et al., 1997; Loveless and MacLeod, 1999; Browder et al., 2000).

## 2.1 Ricostruzione della duna

---

Le dune costiere sono un importante elemento di protezione e l'ultima linea difensiva contro l'attacco del moto ondoso. Esse rappresentano inoltre una riserva di sabbia che, in occasione delle tempeste eccezionali, rifornisce la spiaggia di parte del sedimento asportato dal mare. Inoltre, la vegetazione trattiene il sedimento che altrimenti verrebbe sollevato dal vento e perso. La falda presente all'interno della duna costituisce un'importante barriera di acqua dolce contro l'ingressione di acqua salata. Queste importanti caratteristiche fanno sì che la presenza della duna acquisisca molteplici significati da considerare nell'ottica della difesa costiera. Ma costituisce anche un delicato ecosistema da salvaguardare.

Un progetto di restauro può implicare il rafforzamento di una duna naturale esistente in altezza o in superficie, mentre sempre più spesso gli interventi operati mirano ad una ricostruzione laddove essa sia stata erosa dal mare o sbancata dall'uomo. Questi interventi a volte vengono effettuati per accelerare la crescita naturale di queste morfologie o per garantire loro una maggiore stabilità e durata.

Lo strumento di calcolo necessario per studiare le dinamiche evolutive delle dune e quindi per progettarne il ripristino è fornito dalle diverse equazioni che stimano la capacità di trasporto eolico, fattore responsabile dello sviluppo e della crescita della duna.

In letteratura esistono numerosi studi che mirano a correlare la velocità del vento  $u^*$  e lo sforzo tangenziale critico  $\tau^*$  all'interfaccia con la sabbia, oltrepassato il quale il materiale comincia a muoversi. Ad esempio,  $u^*$  e  $\tau^*$  aumentano con l'umidità o con la presenza di ostacoli (frammenti di conchiglie, vegetazione, ecc.) che aumentano la rugosità superficiale e con l'omogeneità granulometrica (sedimento classato) (Vega et al., 2007). Fra le diverse formulazioni presenti in letteratura meritano una menzione particolare quelle proposte da Bagnold (1941) e da Hsu (1974).

Le equazioni, valide per il caso di sabbia ben classata e secca, si presentano come meri strumenti di stima della quantità di sedimento trasportato per effetto dell'azione del vento. Per un calcolo maggiormente rigoroso andrebbero contabilizzati anche ulteriori effetti quali quelli dell'umidità locale, della vegetazione sui profili di velocità

del vento stesso, della rugosità, della forma della distribuzione granulometrica dei sedimenti o quelli legati alla modifica del profilo di velocità del vento con la quota.

Negli interventi di restauro e ricostruzione delle dune, particolare attenzione va dedicata alla sagomatura del nuovo profilo che deve essere realizzato in maniera da ridurre al minimo la formazione di turbolenza per effetto dell'azione deflattiva del vento. Nel caso di duna scalzata al piede direttamente dal moto ondoso, l'intervento viene realizzato utilizzando delle strutture a protezione del piede, o con l'impiego di geotessili a membrana, impiegati con buon successo in Danimarca a partire dagli anni '90 (Fig. 2.2; Dette et al., 1994).

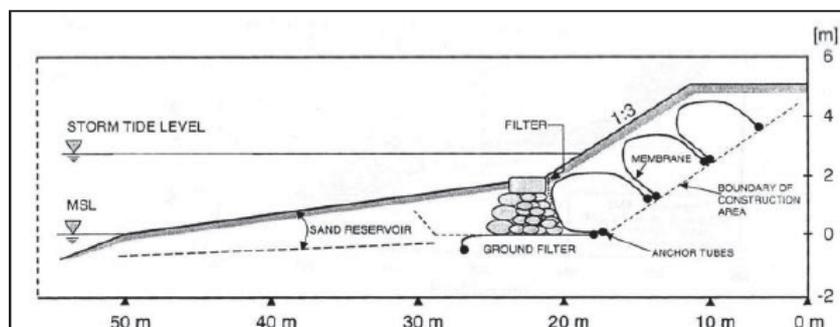


Fig. 2.2 - Protezione della duna di spiagge strette (Dette et al., 1994)

Uno dei primi interventi di ricostruzione dunale realizzato in Italia è quello del litorale del Cavallino (VE) effettuato negli anni '90 con sabbie relitte prelevate a circa 15km dalla costa. La zona delle dune è stata protetta con delle recinzioni e con elementi frangivento e si è provveduto alla stabilizzazione delle dune mediante la piantumazione di *Ammophila littoralis* (*European Beachgrass*).

Altro interessante caso di intervento di restauro dunale è certamente quello del Parco Nazionale del Circeo. Il cordone dunale alto mediamente 12 m, lungo 30 km e largo mediamente 250 m presentava in molti tratti evidenti morfologie erosive. In attuazione di un Progetto LIFE, nel triennio 1995-1998 sono stati realizzati numerosi interventi di restauro con la disposizione di sistemi frangivento di diversa tipologia.

Altri esempi della ricostruzione di dune costiere sono l'intervento eseguito nell'area di foce del Po di Goro (Fig. 2.3; Simeoni, 2003) e l'intervento nell'area di foce del Torrente Bevano (AA.VV., 2010).

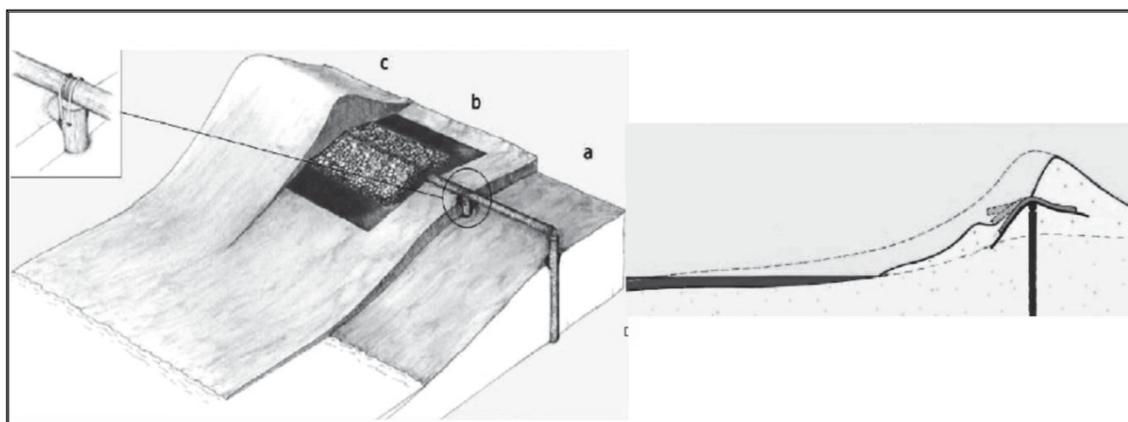


Fig. 2.3 - Rinforzo delle dune costiere alla foce del Po di Goro (Simeoni, 2003).

## 2.2 Ripascimento della spiaggia emersa e intertidale

---

Il ripascimento costiero è un ripristino artificiale delle condizioni preesistenti o ideali di tratti sabbiosi, quasi sempre utilizzati a fini turistici presso località balneari, attraverso l'azione di riporto di volumi di sabbia.

Il ripascimento artificiale è una azione molto delicata e complessa e deve rispettare severe norme di attuazione. Deve includere un progetto di intervento che tenga conto dei seguenti punti: frequenza di ricarica, durata dell'intervento, tassi di erosione pre e post intervento, profilo di equilibrio post ripascimento, quantità di sedimento, compatibilità granulometrica, risorse di sedimento a lungo termine, posizione e modalità di versamento, possibili impatti ambientali.

Nella ricostruzione della spiaggia è necessario affrontare un'analisi della sua evoluzione trasversale e longitudinale al fine di computare il volume minimo da versare che varia in funzione dell'accrescimento atteso. Tale metodo è basato sul concetto di profilo di equilibrio (Dean, 1991). Il profilo parabolico di equilibrio che è espresso dalla formula

$$d = A x^{2/3},$$

dove  $d$  è la profondità a una certa distanza orizzontale e  $x$  la linea di riva. Il parametro adimensionale  $A$  è espresso come  $A = 0.21 D^{0.48}$ , dove  $D$  rappresenta la dimensione del sedimento. In base a questa formula, viene calcolato il volume necessario in funzione della tipologia di profilo che si vuole ottenere.

In alternativa è spesso utilizzato anche il *metodo dell'equilibrio della pendenza* (Pilarczik et al., 1986), secondo il quale la granulometria del sedimento di prestito determina la pendenza del profilo ripasciuto, secondo la formula

$$I_R = (W_N/W_R)^{0.56} I_N,$$

dove  $W$  è la velocità di sedimentazione (*fall velocity*) espressa come  $w = 14 D^{1.1}$ ,  $I$  è la distanza dalla linea di riva,  $N$  e  $R$  si riferiscono rispettivamente al materiale nativo ed a quello di prestito.

Se il materiale di prestito è più grossolano del materiale nativo ( $W_R > W_N$ ) il profilo della spiaggia ripasciuta risulterà più pendente di quello originale. L'effetto opposto risulterà dall'uso di materiale fine per ripascere la spiaggia.

Per il calcolo della profondità di chiusura del profilo attivo della spiaggia, ci si avvale della formula di Hallermeier (1981) che utilizza la teoria delle onde lineari per *shoaling wave*:

$$d_l = 2.28H_e - 68.5 \left( \frac{H_e^2}{gT_e^2} \right)$$

in cui  $d_l$  è la profondità di chiusura annuale (**DoC**) sotto il livello medio marino,  $H_e$  è l'altezza d'onda significativa in acque profonde superata per dodici ore all'anno,  $T_e$  è il corrispondente periodo d'onda e  $g$  è l'accelerazione di gravità.

In letteratura esistono numerosi esempi di ripascimento della spiaggia. Nella Regione Emilia Romagna tali attività sono oramai consolidate nelle normali pratiche di gestione della fascia costiera (Arpa, 2002; Simeoni et al., 2003; Arpa, 2007).

Si vuole ricordare l'intervento di by-pass eseguito nel litorale ferrarese in cui fu prelevato materiale sul litorale di Lido degli Estensi in forte avanzamento (+10 m/anno, Preti, 2002) e attraverso un sabbiodotto fu effettuato un rifluimento delle spiagge settentrionali della Provincia.

Due altri importanti interventi di ripascimento, chiamati "Progettone 1" (800.000 m<sup>3</sup> nel 2002) e "Progettone 2" (815.000 m<sup>3</sup> nel 2007), hanno interessato diverse spiagge regionali. Essi sono stati realizzati mediante versamento di sabbie prelevate al largo da giacimenti sottomarini, ottimizzando i costi e le operazioni di versamento.

### 2.3 Ripascimento sommerso

---

Il ripascimento sommerso dei fondali può essere condotto versando il materiale secondo una configurazione teorica in equilibrio idrodinamico, che tende a ricostruire la morfologia di una barra sommersa o a riempire il truogolo antistante la barra più esterna (USACE, 1995).

E' da sottolineare che questa tipologia d'intervento è diventata sempre più comune ed utilizzata principalmente per lo smaltimento di sedimenti derivanti da dragaggi (portuali, di canali, ecc.). Molte informazioni reperibili in letteratura ed inerenti ai ripascimenti sommersi provengono da rapporti tecnici di monitoraggi piuttosto che da articoli scientifici. Ciò enfatizza la necessità di approfondire la ricerca scientifica su questo argomento.

Nello specifico, la realizzazione di una barra artificiale parte dal concetto che può modificare la risposta morfodinamica della spiaggia al variare delle condizioni d'onda. Essa viene dunque considerata estremamente efficiente nel favorire la protezione dell'arenile da eventi di mareggiata.

La realizzazione della barra può essere eseguita con diverse modalità in funzione del risultato da ottenere (Grunnet et al., 2004; van Rijn, 2004):

- "alimentazione" (*feeder berm*), quando la barra viene posizionata nella zona di *surf*; in questo caso il materiale viene gradatamente eroso dal frangimento delle onde e trasportato *onshore* andando ad alimentare i fondali sottocosta;

- “frangionda” (*reef berm*), quando è posta a profondità maggiore, vicina alla zona di chiusura del profilo; in questo caso la barra assume un ruolo di filtro, andando ad attenuare l’energia delle onde maggiori, durante le mareggiate e creando così una zona protetta sottocosta.

Si comprende dunque come, nel primo caso, il materiale venga eroso più rapidamente; infatti, essendo in acque meno profonde, la barra è esposta anche ad onde con altezze minori. Questo tipo di barra richiede dunque il mantenimento di un volume minimo richiesto, affinché mantenga la sua efficienza ed assicuri un continuo approvvigionamento di sedimento alla spiaggia. Nel secondo caso, gran parte del volume rimane in posto per parecchio tempo (anni) e il suo mantenimento può avvenire con intervalli di tempo più lunghi.

Gli effetti del ripascimento sommerso sull’idrodinamica locale possono essere schematizzati principalmente in un effetto lungocosta ed un effetto trasversale a costa. Il primo è dovuto al rallentamento della corrente *longshore* e, quindi, del trasporto per la presenza del ripascimento; ciò favorisce una sedimentazione nella zona sopraflutto. Il secondo effetto è legato al frangimento delle onde sulla cresta della barra artificiale ed alla conseguente dissipazione dell’energia del moto ondoso. Ne risulta una componente del flusso diretta verso costa che contribuisce al trasporto *onshore* del sedimento (Fig. 2.4, Van Rijn and Walstra, 2004).

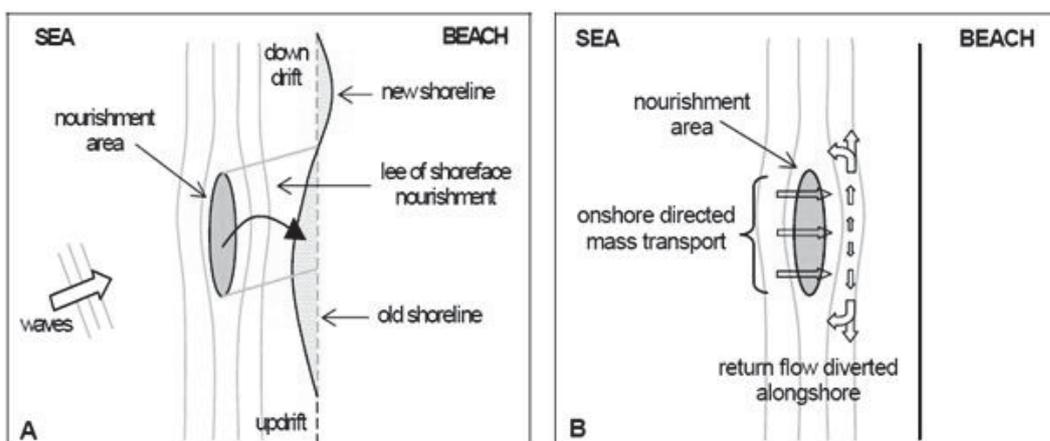


Fig. 2.4 - Effetti morfologici a seguito di un ripascimento a largo con la creazione di una barra (area in giallo) (da van Rijn and Walstra, 2004)

### 2.3.1 Aspetti generali per la progettazione di ripascimenti sommersi

Larson and Kraus (1992a, 1992b, and 1994) studiando le barre longitudinali presso Duck (Nord Carolina) conclusero che il comportamento di queste morfologie poteva essere confrontabile con quello di barre artificiali realizzate nella zona *nearshore*. Dalla raccolta di numerosi dati, mediante due rilievi circa al mese per un decennio, questi studiosi hanno creato un profilo di riferimento mediato sui profili *cross-shore* rilevati. Essi si sono basati sul profilo di equilibrio di Dean (1977) che teneva in considerazione la variabilità granulometrica utilizzando la seguente equazione:

$$h = A_* \left[ x + \frac{1}{\lambda} \left( \frac{D_0}{D_\infty} - 1 \right) (1 - e^{-\lambda x}) \right]^{2/3}$$

con  $h$  la colonna d'acqua,  $x$  la distanza *cross-shore*,  $A_*$  il parametro di forma,  $D_0$  la dissipazione dell'energia dell'onda per unità di volume sottocosta,  $D_\infty$  la dissipazione dell'energia dell'onda per unità di volume al largo e  $\lambda$  la lunghezza caratteristica in cui  $D_0$  raggiunge  $D_\infty$ .

Definito un profilo rappresentativo e confrontato con quello di riferimento, per correlare le proprietà della barra con quelle delle onde, scelsero una soglia per gli eventi in grado di determinare importanti variazioni morfologiche. Attraverso questo approccio gli autori giunsero alla definizione di alcune relazioni quali:

$$h_0/(H_0)_{\max}; \quad h_0/(L_0)_{\text{med}}; \quad \Delta V_b/H_0^2; \quad (H_0/wT)_{\text{med}},$$

dove  $h$  è la profondità dell'acqua,  $H_0$  è l'altezza d'onda al largo,  $L_0$  è la lunghezza d'onda al largo,  $\Delta V_b$  è la variazione volumetrica della barra,  $w$  è la velocità di caduta del sedimento e  $T$  è il periodo d'onda.

Per le proprietà geometriche della barra, trovarono importanti correlazioni tra volume-altezza e volume-lunghezza. I criteri ottenuti dagli studi presso Duck furono applicati per predire il movimento di barre artificiali in California perché ritenuti idonei per coste esposte ad onde molto energetiche.

Usando il criterio proposto da Hallermeier (1981), Hand and Hallison (1991) derivato dallo studio di 11 barre artificiali, fu formulata una correlazione tra la profondità di realizzazione e la sua stabilità. Infatti, Hallermeier (1981) suddivise il profilo di spiaggia in zone, in funzione della mobilitazione della sabbia ad opera delle onde, utilizzando due limiti, denominati  $d_i$  e  $d_e$ :

il primo corrisponde al limite della zona in cui vi è un trasporto lungocosta significativo e un intenso trasporto *cross-shore* durante condizioni energetiche;

il secondo è il limite oltre il quale non vi è mobilitazione di sabbia durante condizioni ondose mediamente energetiche (Fig. 2.5).

Oltre a ciò, Hallermeier suggerì anche che, in occasione di ripascimenti sommersi, il versamento dovesse essere effettuato all'interno del limite  $d_i$ .

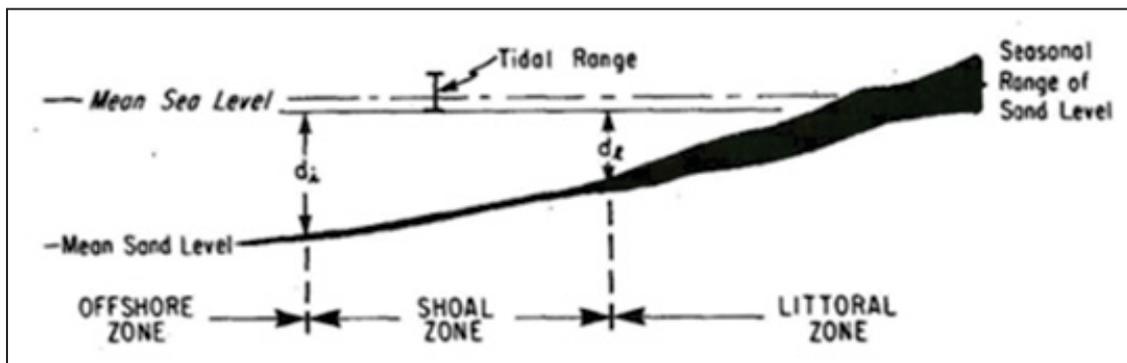


Fig. 2.5 - Zonazione cross-shore del profilo di spiaggia sommersa (Hallermeier, 1981).

Hand and Hallison (1991) conclusero che, per realizzare barre di alimentazione, il versamento dovrebbe essere eseguito entro il limite interno ( $d_i$ ), denominato dagli autori stessi HIL, mentre per realizzare barre con la funzione di "frangi-onda", il versamento dovrebbe essere eseguito oltre il limite esterno  $d_e$ , HOL.

Allison and Pollack (1993), conducendo alcune simulazioni numeriche su una barra sommersa realizzata in California, valutarono i parametri morfometrici idonei per la realizzazione di barre artificiali. Gli studi evidenziarono che, per profondità di circa 5,4 m, la barra dovesse avere una cresta di ampiezza 60 m o maggiore, una lunghezza di 600 m o maggiore ed una pendenza del fianco interno 1:25 (2,3°) e di quello esterno da 1:50 (1°) a 1:125 (0,5°).

Lo studio condotto da Van Rijn and Walstra (2004) su vari ripascimenti sommersi olandesi, suggerisce che il versamento dovrebbe essere effettuato parallelamente alla linea di riva, per una lunghezza di almeno 10 volte la lunghezza d'onda locale. Inoltre, la cresta della barra dovrebbe avere un'ampiezza da 0,5 a 1 volta la lunghezza d'onda locale (circa 5-10 volte la profondità del fondale locale), le pendenze dei fianchi dovrebbero essere circa da 1:30 a 1:50, con la parte terminale 1:100, per ridurre gli effetti dell'onda dovuti alla rifrazione. Infine, secondo gli stessi autori, la posizione del versamento dovrebbe essere abbastanza lontana da canali o da bocche lagunari.

### 2.3.2 Esempi di realizzazione di ripascimenti sommersi

---

La letteratura internazionale riporta alcuni esempi di ripascimento della spiaggia sommersa nei Paesi Bassi, in Danimarca, in Belgio e negli Stati Uniti (Grunnet, 2004). Tale metodologia di intervento in tali paesi è diventata oggi una pratica comune per la mitigazione dell'erosione costiera.

Generalmente in Nord Europa questo tipo di ripascimento viene effettuato tra le profondità di 4-8 m e si utilizzano volumi di materiale sabbioso compresi tra 1 e 2,2 milioni di m<sup>3</sup> (Johnson et al., 2001; Grunnet et al., 2004; van Duin et al., 2004). Il ripascimento eseguito su fondali in cui sono presenti barre diventa spesso parte del sistema dinamico della barra (van Duin et al., 2004; Grunnet and Ruessink, 2005), portando a un'evoluzione morfodinamica complessa dell'intero sistema.

Studi morfodinamici sulla barra "frangionda" in acque relativamente profonde presso Perdido Key (Florida, USA) hanno dimostrato che la barra, la cui cresta aveva una sommergenza oltre i 5 m, non migrò verso costa ma restò piuttosto stabile, appianandosi leggermente (Work & Dean, 1995; Work & Otay, 1996). Soltanto le onde più alte vi frangevano e l'energia che raggiungeva la costa era fortemente ridotta. Ne risultò una significativa riduzione dell'erosione della spiaggia, grazie all'effetto di protezione dato dalla barra stessa.

Da tali studi emerse inoltre un'importante indicazione sulle modalità di realizzazione della barra "frangionda": sebbene anche le onde non frangenti

mostrassero una riduzione dell'energia nei fondali protetti, in condizioni di frangenza tale riduzione era molto maggiore. Non vi fu inoltre una grande erosione della cresta della barra durante le ondate di tempesta ma, comunque, si rilevò un aumento del volume del 20% della spiaggia protetta

Osservazioni sugli effetti della barra di "alimentazione" evidenziarono invece una migrazione della barra verso costa nella quasi totalità dei casi.

Juhnke, Mitchell and Piszker (1990) monitorarono la realizzazione di una barra sommersa presso Silver Strand State Park (San Diego, California) effettuato utilizzando sedimenti derivanti dal dragaggio del porto di San Diego. La barra (lunga 360, ampia 180 m ed alta circa 2 m) venne erosa, si appiattì e migrò verso costa.

Tra i casi più studiati in Europa, per quanto riguarda la barra di alimentazione, vi sono quelli di Terschelling ed Egmond aan Zee (NL), considerati due particolari *hot spots* erosivi dei Paesi Bassi.

Nel 1993, attraverso il progetto NOURTEC è stato eseguito un intervento di ripascimento della spiaggia sommersa presso i fondali dell'isola barriera di Terschelling (NL). Il progetto, descritto da Hoekstra et al. (1994), ha previsto il versamento di sabbia nel trugolo tra la barra intermedia e la barra esterna (Fig. 2.6).

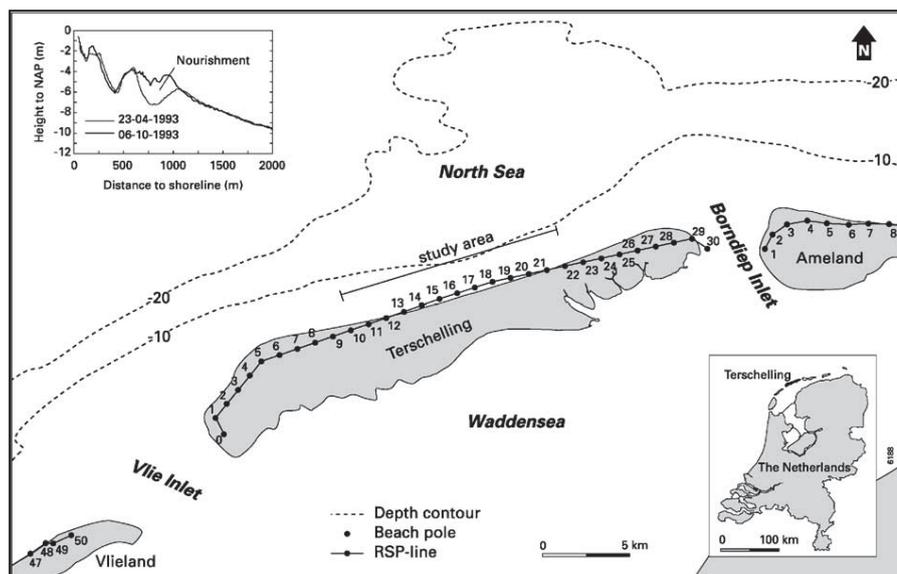


Fig. 2.6 - Posizione del versamento di 2,1 Mm<sup>3</sup> di sabbia nel trugolo tra la barra intermedia e quella esterna tra le profondità di -5m e -7m. (da Grunnet & Ruessink, 2005).

A seguito del ripascimento, la migrazione *offshore* delle barre, descritta nel lavoro di Ruessink and Kroon (1994), si arrestò per un periodo di 6–7 anni. Inoltre i rilievi condotti evidenziarono durante la prima stagione invernale una grande migrazione *onshore* della sabbia versata che andò ad innalzare la barra posizionata più prossima a riva (*feeder effect*). Questa barra andò ad interrompere il *drift* naturale (*lee effect*), favorendo un sostanziale aumento dell'ampiezza della spiaggia ed una maggior dissipazione delle onde. La barra si frammentò in diverse parti, assumendo una morfologia fortemente complessa (*three-dimensional morphology*).

La risposta della linea di costa fu significativa in quanto il tasso di erosione di circa -3 m/anno si invertì, nella zona centrale del ripascimento, in un avanzamento di circa +15 m/anno. I rilievi eseguiti durante il monitoraggio evidenziarono il perdurare di tali effetti per circa 5 anni, dopo i quali si ripresentarono i processi erosivi con velocità paragonabili a quelli del pre-ripascimento.

Per quanto riguarda l'hot spot erosivo presso Egmond aan Zee (NL), nel 1999 è stato eseguito un ripascimento della barra esterna (tra le profondità di circa -5 -7 m) combinato con un ripascimento della spiaggia emersa e battigia Van Duin et al. (2004) (Fig. 2.7). Il monitoraggio dell'evoluzione della spiaggia a seguito del ripascimento ha evidenziato come il sedimento della barra, andandosi a depositare sui fondali prossimi a costa, abbia contribuito ad una maggior dissipazione dell'energia ondosa. Il sedimento versato non ebbe un effetto diretto sulla spiaggia come a Terschelling, piuttosto si comportò come una barriera in grado di creare una zona d'ombra all'attacco del moto ondoso. Gli autori ipotizzarono due effetti principali:

- una riduzione della corrente lungocosta in seguito al frangimento delle onde maggiori sul ripascimento
- un trasporto cross-shore diretto verso costa causato dallo shoaling delle onde che contribuì al bilancio sedimentario della zona di surf.

Soltanto dopo 2 anni si osservò lo smantellamento della barra e la deposizione di sedimento sottocosta, il quale determinò un aumento del volume della spiaggia di 110-390 m<sup>3</sup>/m. In questo caso gli effetti del ripascimento si esaurirono entro i primi 3 anni dall'intervento.

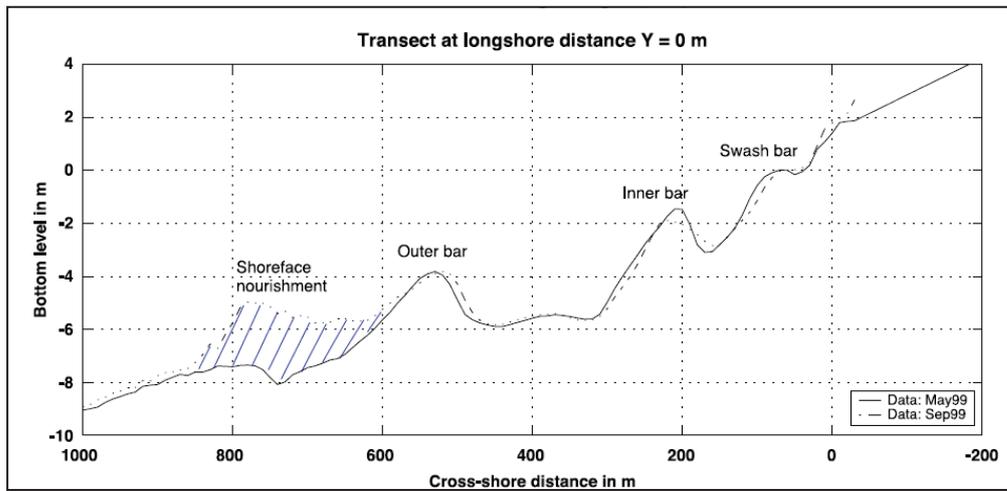


Fig. 2.7 - Posizione del ripascimento eseguito ad Edgmond: circa 900.000 m<sup>3</sup> di sedimento fu versato nel lato verso mare della barra esterna, alla profondità di -6/-8m (da van Duin, Wieserma, Walstra, van Rijn and Stive, 2004).

Un ulteriore caso riguarda la realizzazione di un ripascimento sommerso nel 1977 nei fondali presso Delfland (NL). L'intervento consistette in un versamento di 1 Mm<sup>3</sup> tra le profondità -5/-7 m abbinato ad un versamento sulla spiaggia emersa di 834.000m<sup>3</sup> di sabbia (Fig. 2.8).

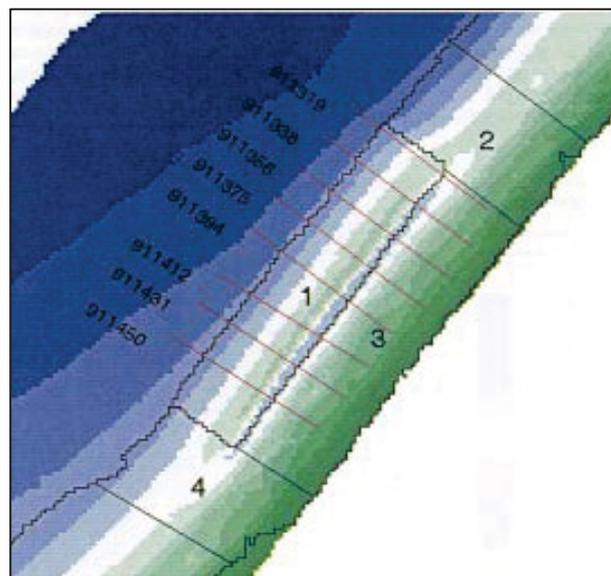


Fig. 2.8 - Intervento di ripascimento sommerso a Delfland (NL).

Le indagini condotte confermarono lo stesso trend evolutivo riscontrato negli altri casi, con l'alimentazione dei fondali sottocosta e della battigia; la corrente lungo costa non asportò in maniera significativa il materiale del ripascimento infatti, dopo 4 anni, il 70% del materiale era ancora in posto.

Un ulteriore esempio è fornito dallo studio di Charlier and De Meyer (2000), sull'intervento eseguito in Belgio nel 1991 che ha visto la realizzazione di una barra di alimentazione. Gli autori evidenziarono il grande successo di tale intervento nella difesa costiera dall'erosione.

In letteratura esistono numerosi altri casi di ricostruzione di barre sommerse in Nuova Zelanda, Sud Africa, Giappone e Australia con effetto di "alimentazione" o di "frangionda": le prime (posizionate tra -4 e -8 m di profondità, con altezze da 1 a 3 m e lunghezze tra 1 e 3 km) mostrarono una tendenza a migrare verso costa mentre le barre "frangionda" (posizionate tra -10 e -15 m di profondità e con altezze comprese tra 6-8 m e lunghezze tra 1 e 3 km) si mostrarono più stabili e durature (Murden, 1995).

Van Rijn and Walstra (2004) analizzando diversi interventi di ripascimento sommerso con caratteristiche idrodinamiche e morfodinamiche piuttosto diverse, concordarono sui risultati ottenuti. Osservarono infatti come il bilancio sedimentario nella zona di surf fu positivamente affetto dalla presenza del ripascimento sommerso (*feeder berm*). Infatti il frangimento sulla cresta della barra trasmetteva alla zona sottocosta onde di minor energia, con una ridotta capacità erosiva. Inoltre gli autori osservarono un accumulo di sedimento nella zona protetta dal ripascimento e un'importante diminuzione del trasporto sedimentario verso il largo.

Gli stessi autori hanno evidenziato una durata degli effetti da 2 a 10 anni e un ritardo nell'approvvigionamento della spiaggia emersa rispetto alla fine dei lavori. Per tale ragione, essi consigliano:

- la programmazione di piccoli interventi aggiuntivi di ripascimento sulla spiaggia nel periodo iniziale, per tamponare il fenomeno di erosione fino a che la barra di alimentazione non entri in funzione;
- ulteriori interventi di mantenimento della morfologia della barra, affinché continui ad essere efficiente per diversi anni.



### 3 Le barre sommerse

---

Le barre sono accumuli sabbiosi generalmente presenti nella zona di *surf*<sup>1</sup> e sono la maggior espressione dell'idrodinamismo e dei gradienti di trasporto sedimentario. Esse, pur essendo una morfologia piuttosto comune della porzione sommersa delle spiagge di tutto il mondo, non sono tuttavia sempre presenti.

#### 3.1 Genesi

---

Negli ultimi decenni sono stati proposti vari meccanismi per spiegare la formazione delle barre subtidali. Essi possono essere suddivisi nel meccanismo relativo al (1) *break-point* (punto di frangenza), nel meccanismo relativo alle (2) *infragravity wave* (onde infragravitative) ed in quello relativo alla (3) *self-organization*.

I primi due meccanismi sono stati ampiamente descritti ed entrambi partono dal concetto che le barre si formano a causa dell'esistenza di un campo di flusso ben definito che viene memorizzato dal fondale. Il terzo meccanismo invece si basa sul concetto che la barra sia dovuta all'interazione tra un flusso non lineare e la topografia. Quindi partendo da un profilo senza barre e completamente regolare, il meccanismo della *self-organization* non può formare barre contrariamente agli altri due. Da sottolineare però che su un profilo *nearshore* non si verifica mai l'assenza totale di una perturbazione.

(1) Meccanismo del *break-point*: la barra (bidimensionale) si forma quando onde incidenti con periodo corto inizialmente frangono in un punto (*breakpoint*) e quest'ultimo è funzione dei gradienti dei processi che avvengono nel paraggio (King and Williams, 1949; Dyhr-Nielsen and Sørensen, 1970; Dally and Dean, 1984; Stive, 1986; Sallenger and Howd, 1989).

---

<sup>1</sup> La zona di *surf* è la zona compresa tra la linea di riva (che varia in funzione delle condizioni ondometriche, marea, setup, surge, ecc.) ed il punto più al largo di frangenza delle onde.

I gradienti possono essere relativi ad un singolo processo (ad esempio l'erosione data dai frangenti *plunging*) così come al trasporto indotto da campi di flusso compositi (ad esempio, i gradienti *cross-shore* indotti da effetti combinati di corrente di ritorno e asimmetria dell'onda). Partendo da questo concetto, barre multiple possono essere dovute a multipli punti di frangenza, dovuti alla distruzione e seguente formazione di onde. Tale meccanismo è stato dimostrato anche in esperimenti condotti in canaletta (Dally, 1987).

Ricerche ed esperimenti in laboratorio, condotti con onde regolari, hanno dimostrato come la formazione di barre sia legata ad onde frangenti di tipo *plunging*, le quali erodono il sedimento sul fondo e lo depositano subito *offshore* del punto di frangenza creando una barra (Keulegan, 1948; Shepard, 1950; Miller, 1976). In spiagge naturali, però, in cui si succedono onde irregolari, ciò non avviene finché le onde non frangono ripetutamente nello stesso punto. Pertanto sembra che la formazione delle barre sia preferibilmente il risultato di un processo di trasporto sedimentario associato alla posizione di nodi ed antinodi di onde stazionarie *cross-shore* (Carter et al., 1973; Short, 1975; Bowen, 1980) o progressive *edge waves* (Bowen, 1980) e/o all'interazione tra flussi *onshore* ed *offshore* (*cross-shore*) (Aagaard and Masselink, 1999).

Tale teoria prevede la convergenza di due flussi, quello generato dalla corrente di ritorno (*undertow*) diretto verso il largo e quello generato dall'asimmetria del flusso associato ai fenomeni di *shoaling*, diretto verso costa. Pertanto *offshore* del punto di frangenza vi è una corrente al fondo diretta verso costa, mentre *onshore* del punto di frangenza la corrente al fondo è diretta verso il largo. Nella zona in cui i due flussi convergono si verifica la deposizione di sedimento e la formazione della barra (Aagaard et al., 1998).

La distanza da costa della cresta della barra secondo Holman and Sallenger (1993) è descritta da una formula che mette in relazione la profondità al punto di frangenza, il gradiente topografico e l'altezza d'onda. La formazione di barre multiple può essere spiegata assumendo multipli punti di frangenza (Davidson-Arnott, 1981) dovuti ad una prima frangenza delle onde maggiori al largo ed alla successiva formazione di onde più piccole che frangono in zone più prossime a costa, su fondali meno profondi. Ciò determina la formazione di barre a diverse profondità e di diverse dimensioni.

Un'altra spiegazione potrebbe essere fornita dalla variazione delle caratteristiche ondamiche (Evans, 1940; Kings and Williams, 1949), correlando le barre esterne al punto di frangenza durante le mareggiate e le barre interne al punto di frangenza durante climi ondometrici meno energetici. Infatti durante tali condizioni, onde più piccole non raggiungono la cresta delle barre esterne che permangono sul fondo, come morfologia relitta. Una terza spiegazione fornita da Komar (1976) è legata alla variazione tidale la quale comporta uno spostamento del punto di frangenza; l'azione tidale infatti può determinare la formazione di barre durante la bassa marea, non più raggiungibili dalle onde in alta marea. Viceversa, barre formate durante l'alta marea possono essere esposte all'azione delle onde in bassa marea.

(2) Esperimenti in laboratorio hanno dimostrato che le barre sono il risultato della riflessione delle onde incidenti sulla riva (Carter, 1973), che determina un'onda stazionaria (*infragravity standing wave*)<sup>2</sup> con direzione *cross-shore* in grado di generare un flusso sedimentario orizzontale al fondo: il trasporto forma una serie di celle, con le correnti al fondo che divergono nei nodi e convergono nella posizione degli antinodi. Il sedimento trasportato si deposita dove i flussi convergono cioè nei punti anodali (Fig. 3.1) (Komar, 1998).

Le onde infragravitiche stazionarie possono spiegare la formazione di numerose morfologie presenti nella zona del *nearshore*, includendo le *rip current* (Bowen and Inmann, 1969), le barre festonate (Bowen and Inmann, 1971), le barre multiple longitudinali (Short, 1975; Bowen, 1980) descritte nel seguente paragrafo. L'ampio *range* di variabilità di tali onde e della loro frequenza determina oltre a differenti morfologie anche una variabilità della loro spaziatura e distanza da riva (Aagaard, 1990).

---

<sup>2</sup> *Nearshore-standing infragravity wave* sono onde a bassa frequenza che stazionano nella direzione *cross-shore*. Esse possono essere di tipo bidimensionale, caratterizzate da una successione di nodi ed antinodi oltre il punto di riflessione (linea di riva) o di tipo tridimensionale (*Edge waves*) intrappolate nella zona *nearshore* dalla riflessione e rifrazione che si possono propagare lungocosta (*progressive Edge waves*) o rimanere nella stessa posizione (*standing Edge waves*). Le *Edge waves* sono caratterizzate da un numero finito di nodi/antinodi nella direzione *cross-shore* e teoricamente un numero infinito di nodi/antinodi nella direzione *longshore*.

Anche la topografia determina un controllo sulla permanenza delle barre: la presenza di una barra in corrispondenza di un antinodo di una onda stazionaria tende ad intrappolare una *edge wave* che porta ad un mantenimento o una crescita della barra fino ad una variazione delle condizioni idrodinamiche (Kirby et al., 1981; Bryan and Bowen, 1996).

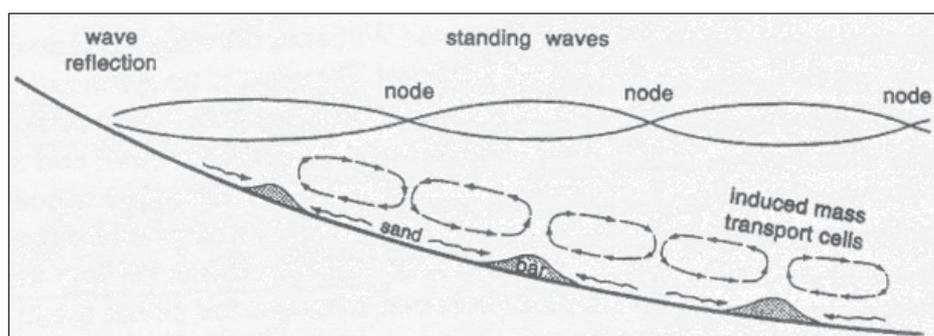


Fig. 3.1 - Schema illustrante la formazione di barre associate alle onde stazionarie, dovute alla riflessione delle onde sulla riva (da Komar, 1998).

La presenza di barre multiple quindi può essere spiegata con la presenza di nodi ed antinodi multipli nella direzione *cross-shore*, in funzione della presenza di *leaky waves* e, una volta formate, le barre stesse possono intrappolare le *edge waves* (Bryan and Bowen, 1998).

(3) Il meccanismo della *self-organization* include l'interazione non lineare tra le correnti *longshore* indotte dalle onde e il fondale (Falques et al., 1996) e l'interazione non lineare tra lo *shoaling*, le onde incidenti ed il fondale (Boczar-Karakiewicz and Davidson-Arnott, 1987).

Questi meccanismi sfruttano il fatto che la non linearità dei processi di trasporto sedimentario e l'idrodinamica della zona di *surf* hanno un ampio potenziale nell'indurre un comportamento *self-organized*. Generalmente questo approccio richiede la presenza di strutture preesistenti come input, ma può spiegare come differenti tipi di barre possono svilupparsi su un fondale avente le stesse caratteristiche di sedimento, pendenza e condizioni ondose (Bowman and Goldsmith,

1983; Wijnberg, 1995). Comunque autori come Hulscher (1996) evidenziano la non corrispondenza tra la scala della spaziatura *cross-shore* delle barre rispetto alle caratteristiche predette dai modelli non lineari. Secondo Wijnberg and Kroon (2002) non vi è un'evidenza che giustifichi la selezione di un solo meccanismo per la generazione di barre, probabilmente perché più elementi concorrono nella loro formazione.

## 3.2 Morfologia

---

Le barre possono assumere numerose configurazioni morfologiche, da rettilinee (*longshore or linear bars*) a festonate (*crested bars*), a trasverse (*transverse bars*) e possono essere attaccate a costa o disporsi ad una certa distanza dalla stessa in maniera continua o frammentate da *rip current*. La loro morfologia sembra essere estremamente legata all'energia del moto ondoso, con barre trasverse tipiche di climi ondosi miti e barre rettilinee tipiche di climi ondosi energetici, e barre festonate in condizioni energetiche intermedie (Bondesan e Simeoni, 1983). Inoltre, si possono osservare sistemi formati da più successioni di barre, aventi diversa orientazione, dimensione e morfologia (Shepard, 1950; Komar, 1976; Armaroli e Ciavola, 2011). Numerosi autori hanno presentato delle classificazioni dei vari tipi di barre, in funzione delle loro osservazioni in natura (Greenwood and Davidson-Arnott, 1979; Chappell and Eliot, 1979; Short, 1979; Wright et al., 1979; Goldsmith et al., 1982; Wright and Short, 1983; Wright and Short, 1984; Sunamura, 1988; Lippman and Holman, 1990; Wijnberg and Kroon, 2002) (Fig. 3.2). I vari autori correlano il "beach state" alle caratteristiche dell'onda e/o alle caratteristiche del sedimento e alla pendenza della zona di *surf*. Un esempio è il parametro denominato "surf similarity parameters" (Battjes, 1974)<sup>3</sup>, che correla il "beach state" alla tipologia d'onda.

---

<sup>3</sup> Le diverse tipologie di onde vengono discretizzate mediante il parametro di *SURF SIMILARITY* (Battjes, 1974)  $\rightarrow$  o parametro di IRIBARREN:  $\xi_b = \frac{\tan\beta}{\sqrt{Hb/L_0}}$ , con  $\tan\beta$  = pendenza della spiaggia,  $H$  = l'altezza dell'onda incidente,  $T$  = periodo,  $g$  = accelerazione di gravità,  $L_0$  = lunghezza d'onda in acque profonde ( $L_0 = gT^2 / 2\pi$  usando la teoria dell'onda lineare, U.S. Army Corps of Engineers, 1984). Al denominatore vi è la ripidità dell'onda ( $H/L$ ). Ne deriva che le onde: SPILLING:  $\xi_b < 0.5$ ; PLUNGING:  $\xi_b = 0.5-3.3$ ; SURGING:  $\xi_b > 3.3$ .

Morfodinamicamente, i due stati estremi sono distinti sulla base del *surf-scaling parameter* (Guza & Inman, 1975):

$$\varepsilon = a_b \omega^2 / g \tan^2 \beta$$

dove  $a_b$  è l'ampiezza del frangente,  $\omega$  è la frequenza in radianti dell'onda incidente ( $2\pi/T$ , con  $T$  il periodo),  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $\beta$  è la pendenza della surf zone.

La completa riflessione avviene per  $\varepsilon < 1,0$ , mentre per  $\varepsilon > 2,5$  le onde cominciano a diventare di tipo *plunging* dissipando energia e quando  $\varepsilon > 20$  diventano di tipo *spilling*.

I due stati estremi appena descritti, i cui profili sommersi sono caratterizzati dalla presenza o dall'assenza di barre, sono stati quindi definiti da numerose correlazioni con le condizioni ondamiche. Già King & Williams (1949) correlarono la direzione del trasporto cross-shore del sedimento alla ripidità dell'onda al largo:

$$H_0/L_0$$

Secondo questa relazione, onde ripide ( $H_0/L_0 > 0,2$ ) favoriscono il trasporto verso il largo, con una probabile formazione di barre; onde a bassa ripidità ( $H_0/L_0 < 0,2$ ) favoriscono al contrario un trasporto verso costa e la scomparsa delle barre.

In seguito ad esperimenti in laboratorio, venne introdotto da Gourlay (1968) e riscritto da Dean (1973) un parametro in grado di definire e separare gli stati morfologici: la velocità di caduta del sedimento (*dimensionless fall velocity*) espressa da

$$\Omega = H_b / \omega_s T$$

dove  $H_b$  è l'altezza d'onda del frangente (m),  $\omega_s$  la velocità di caduta del sedimento (m/s) e  $T$  il periodo d'onda (s), proposto per distinguere le spiagge senza barre ( $\Omega < 1$ ) da quelle con barre ( $\Omega > 1$ ). Tale parametro venne utilizzato da Wright and Short (1984) per distinguere sei stati morfodinamici, che spaziano dal completamente dissipativo al completamente riflessivo ed è basata sulle forme deposizionali e sugli effetti dei processi idrodinamici. Utilizzando il parametro della velocità di caduta adimensionale del sedimento, gli autori distinguono con  $\Omega > 6$  i profili con barra, con  $6 < \Omega < 1$  i profili intermedi e con  $\Omega < 1$  i profili senza barra (Fig. 3.2).

Un parametro simile venne proposto da Sunamura (1984) dove viene inserito il diametro medio del sedimento (mm) nella relazione:

$$K = H_b^2 / gT^2 D.$$

Secondo tale relazione, per  $K > 10$  il profilo è con barra, mentre per  $K < 10$  il profilo è senza barra. Lo stesso parametro, ripreso da Kriebel et al. (1986), utilizza un valore soglia più basso (2-2,5), ottenuto da esperimenti a scala maggiore (Fig. 3.2).

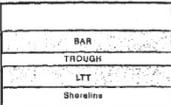
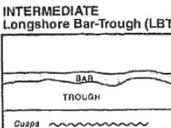
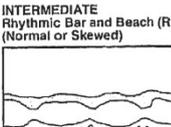
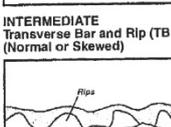
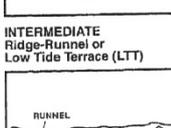
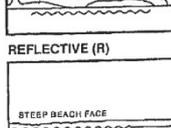
	$\sqrt{L}$	K	
<b>DISSIPATIVE (D)</b> 	>6	>20	<b>BAR TYPE H</b> DISSIPATIVE (unbarred; infragravity scaled surf zone)
<b>INTERMEDIATE Longshore Bar-Trough (LBT)</b> 	~ 5	5-20	<b>BAR TYPE G</b> INFRAGRAVITY SCALED 2-D BAR (longshore variable; non-rhythmic; continuous trough; infragravity scaling)  <b>BAR TYPE F</b> NON-RHYTHMIC, 3-D BAR (longshore variable; non-rhythmic; continuous trough; infragravity scaling)
<b>INTERMEDIATE Rhythmic Bar and Beach (RBB) (Normal or Skewed)</b> 	~ 4	5-20	<b>BAR TYPE E</b> OFFSHORE RHYTHMIC BAR (unbarred; infragravity scaled surf zone)
<b>INTERMEDIATE Transverse Bar and Rip (TBR) (Normal or Skewed)</b> 	~ 3	5-20	<b>BAR TYPE D</b> ATTACHED RHYTHMIC BAR (no coherent longshore rhythmicity; discont. trough; infragravity scaling)  <b>BAR TYPE C</b> NON RHYTHMIC, ATTACHED BAR (little or no longshore rhythmicity; discont. trough; infragravity scaling)
<b>INTERMEDIATE Ridge-Runnel or Low Tide Terrace (LTT)</b> 	~ 2	5-20	<b>BAR TYPE B</b> INCIDENT SCALED BAR (little or no longshore variability; may be attached; incident scaling)
<b>REFLECTIVE (R)</b> 	<1	3.5-10	<b>BAR TYPE A</b> REFLECTIVE (unbarred; incident scaled surf zone)
Wright & Short (1984)		Sunamura (1988)	Lippman & Holman (1990)

Fig. 3.2 - I sei stati morfologici del modello di spiaggia proposti da Wright and Short (1984) confrontati con i loro valori adimensionali di velocità di caduta proposti da Sunamura (1988) e i corrispondenti tipi di barra suggeriti da Lippman and Holman (1990). Da Short and Aagaard, 1993.

Nuovi esperimenti in laboratorio ed osservazioni in campo (Krauss & Larson, 1988, Larson & Krauss, 1989) portarono alla formulazione di un nuovo parametro denominato *profile parameter P* (Darlymple, 1992):

$$P = gH_0^2 / w_s^3 T,$$

con valore di altezza d'onda al largo. Per  $P > 9.000$  il profilo *cross-shore* risulta con barra, mentre per  $P < 9.000$  risulta essere senza barra. Se viene inserita l'altezza d'onda di frangenza, il valore soglia diventa 22.200.

Questi parametri, essendo sviluppati in laboratorio con condizioni controllate, funzionano bene per onde regolari. In natura chiaramente la situazione è complicata dalla tridimensionalità e non risulta chiaro quale parametro di altezza d'onda e periodo utilizzare per onde *random*.

A tal proposito, in condizioni in cui il clima ondoso è caratterizzato da lunghi periodi di onde a bassa energia che si alternano a brevi ed intense mareggiate, si osservano spiagge sommerse in cui sono presenti due o più barre (Evans, 1940; Goldsmith et al., 1982a; Aagaard, 1988; Short, 1992).

In tali casi, la barra più esterna è attiva soltanto durante le mareggiate e può essere considerata come una morfologia relitta durante le condizioni meno energetiche.

La morfologia multi-barra sembra inoltre essere legata anche ad un altro parametro: è stata osservata infatti una tendenza all'aumento del numero di barre con il diminuire della pendenza del profilo (Davidson and Arnott, 1988b). Tali barre sono caratterizzate da una spaziatura che aumenta esponenzialmente nella direzione *offshore*. Short and Aagaard (1993) introdussero un *bar parameter* ( $B$ ) per predire il numero di barre nella zona di surf:

$$B = x_s / gT^2 \tan\beta$$

in funzione della pendenza della spiaggia sommersa ( $\tan\beta$ ), del periodo caratteristico dell'onda incidente durante la mareggiata ( $T$ ) (utilizzato come surrogato dell'onda infragravitativa) e dalla distanza tra la linea di costa ed un punto in cui  $\beta$  tende a 0 ( $x_s$ ). Per valori di  $B < 20$  non sono presenti barre, mentre con  $B = 20-50$  è presente una barra, con  $B = 50-100$  sono presenti 2 barre, con  $B = 100-400$  3 barre e con  $B > 400$  4 barre.

Un'altro tipo di classificazione delle barre è quella che prende in considerazione un nuovo parametro: le caratteristiche ambientali al contorno. Wijnberg and Kroon, (2002), infatti classificano e descrivono le barre in funzione del tipo di costa in cui sono, quali coste semi-protette od aperte e coste fortemente protette (Fig. 3.3).

Bar type	Location	Slope (gradient)	Wave energy	Tidal range
<i>Semi-protected and open coast setting</i>				
Low amplitude ridges	intertidal	0.01-0.005	low (sea environment)	meso- to macrotidal
Slip-face ridges	intertidal	0.03-0.01	low to moderate	micro- to mesotidal
Shore-attached bars	subtidal	} 0.03-0.005	moderate	nontidal to macrotidal
Three-dimensional longshore bars	subtidal		moderate to high	nontidal to macrotidal
Two-dimensional longshore bars	subtidal		high	nontidal to macrotidal
<i>Highly protected setting</i>				
Transverse finger bars	subtidal	} 0.01-0.0005	very low	nontidal to microtidal
Multiple parallel bars	subtidal (and intertidal ?)		very low	nontidal to microtidal (and macrotidal ?)

Fig. 3.3 - Classificazione delle barre sommerse in funzione delle caratteristiche ambientali (da Wijnberg and Kroon, 2002).

Per "coste aperte o semi protette" esistono tre famiglie di barre: barre longitudinali bidimensionali (*two-dimensional longshore bars*), barre longitudinali tridimensionali (*three-dimensional longshore bars*) e barre attaccate a costa (*shore-attached bars*).

Le barre del primo tipo sono uniformi, parallele a costa (*Longshore Bar-Trough state* da Wright and Short, 1984). Le barre del secondo tipo non sono uniformi ma ondulate (o festonate) ma non attaccate a terra ma bensì separate da una morfologia a truogolo ben definita. La variabilità lungocosta va dalle barre festonate ritmiche a quelle non ritmiche (Lippmann and Holman, 1990). Le barre del terzo tipo sono caratterizzate da un'estremità saldata a costa e possono essere sia oblique che perpendicolari, ricadenti nel tipo denominato *Transverse-Bar-and-Rip* da Wright and Short (1984).

Anche secondo Wijnberg and Kroon (2002), come per Wright and Short (1984), vi è una correlazione tra l'occorrenza di questi tre stati ed il valore del parametro proposto della velocità di caduta adimensionale  $\Omega$ : le barre longitudinali bidimensionali tenderebbero ad essere relazionate a più alti valori di  $\Omega$  rispetto a quelle tridimensionali le quali, a loro volta, saranno correlate a valori  $\Omega$  più alti rispetto alle trasversali. Poiché il valore  $\Omega$  è più sensibile alle altezze delle onde frangenti (Short and Aagaard, 1993), la sequenza descritta potrebbe essere interpretata in termini di diminuzione di energia delle onde.

Per "coste fortemente protette", le barre si distinguono in barre parallele multiple (*multiple parallel bars*) e barre trasverse (*transverse bars*) (Greenwood and Davidson-Arnott, 1979; Wijnberg and Kroon, 2002). Le barre del primo tipo sono multiple e

possono avere una morfologia planimetrica sia lineare che ondulata, spesso parallela a costa ma possono essere anche oblique (Nilsson, 1972). Le barre afferenti al secondo tipo sono morfologie orientate perpendicolarmente o con un angolo elevato rispetto alla linea di riva. Requisiti per l'occorrenza di questo tipo di barre sono escursioni tidali e pendenze dei fondali ridotte e bassa energia delle onde (Niederoda, 1972; Greenwood and Davidson-Arnott, 1979).

	Reflective	Intermediate	Dissipative
<i>Dimensionless fall velocity</i> , $\Omega = H_b/TW_s$ (Wright and Short, 1984)	< 1	2-5	> 6
<i>Surf scaling index</i> $\xi = (a\sigma^2)/(g \tan^2 \beta)$ (Guza and Inman, 1975)	0.1-2.5	2.5-20	20-200
<i>Surf similarity index</i> $\Sigma = \tan \beta / (H_b/L_o)^{0.5}$ (Battjes, 1974)	> 1	1-0.23	< 0.23
<i>Beach stability (transport direction) K</i> = $H_b^2/gT_d^2$ (Sunamura, 1984a)	< 3.5	10-20	> 20
<i>Bar parameter</i> $B^* = (x_b/g \tan \beta T_i^2)$ (Short and Aagaard, 1993)	< 20	20-50	> 50
<i>Waves</i>			
<i>Breaker type</i>	Surging	Spilling-plunging	Spilling
<i>Iribarren number</i> $\Sigma_b = \tan \beta / (H_b/L_o)^{0.5}$ (Battjes, 1994)	> 5	5-0.64	< 0.64
<i>Breaker equivalent (Balsillie, 1985)</i>	Plunging-collapsing	Spilling-collapsing	Spilling
<i>Number of waves in surf zone</i>	1	1-3	> 3
<i>Wave reflectivity</i>	High	Moderate	Low
<i>Relative wave energy</i>	Low	Medium	High
<i>Edge wave type</i>	Trapped (in swash)	Trapped (in trough)	Leaky
<i>Edge wave period</i>	Sub-harmonic ( $T_e = 2T$ )	$T_e = 2-4T$	= wave group period $T_e \gg T$
<i>Currents</i>			
<i>Plan</i>	On-offshore	Cellular	On-offshore
<i>Profile</i>	Uprush, backwash	Onshore over bars, seaward in rips	Surface wave bores and bed return flow
<i>Morphology</i>			
<i>Beach profile</i>	Steep	Rhythmic (megacusps)	Flat
<i>Bars</i>	No bar	Rhythmic	Multiple, parallel
<i>Slope</i>	> 4°	2-6°	< 2°
<i>Cusps</i>	Common	On megacusp horns	Rare
<i>Megacusps</i>	Absent	Common	Rare
<i>Sediment transport</i>			
<i>Net longshore</i>	Low	Medium	High
<i>Onshore/offshore</i>	Low	Medium	High
<i>Dominant mode</i>	Bedload	Mixed	Suspended
<i>Texture</i>	Medium-coarse	Fine-medium	Fine
<i>Aeolian</i>	Low	Medium	High
<i>Mobility</i> (Short and Hesp, 1982)			
$y^b = \text{beach width}$			
<i>Shoreline mobility</i> , $S_m = \sigma_{yb}$	Low (< 10 m)	High (> 10 m)	Low (< 10 m)
<i>Backshore mobility</i> , $B_m = CV_{yb} = \sigma_{yb}/J_b$	Low (< 0.1)	Moderate (0.1-0.5)	High (> 0.5)

Fig. 3.4 – Tipi di spiaggia *wave-dominated* in ambiente microtidale e loro caratterizzazione (modif. da Sasaki and Horikawa, 1978; Short and Hesp, 1982; Carter, 1988; Short, 1999).

La morfologia della barra oltre che in planimetria, varia anche in sezione, sempre in funzione dei parametri sopracitati (granulometria del sedimento, le caratteristiche dei fondali e le caratteristiche meteo-marine).

La descrizione della morfologia della barra in sezione proposta da Grunnet and Ruessink (2005) prevede la definizione di alcuni parametri morfometrici calcolati sottraendo un ipotetico profilo non-barrato della spiaggia sommersa dal reale profilo rilevato. I parametri calcolati (Fig. 3.5) includono la posizione della cresta ( $P_b$ ) in funzione della posizione della linea di riva, la profondità della cresta ( $d_b$ ) rispetto al l.m.m., l'altezza ( $h_b$ ) e la larghezza della base ( $W$ ) della barra ed il suo volume ( $V$ ).

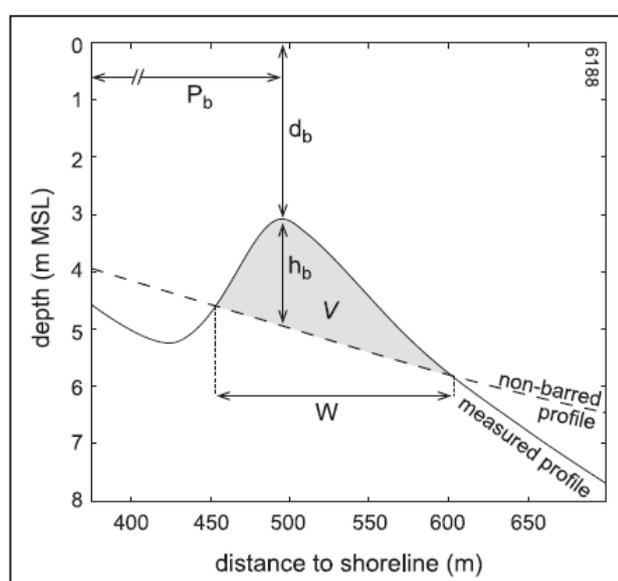


Fig. 3.5 – Parametri morfometrici della barra, definiti in funzione di un teorico profilo senza barra (Grunnet and Ruessink, 2005).

### 3.3 Dinamica

Le barre sono morfologie estremamente dinamiche che tendono a cambiare la loro forma e posizione in risposta alle variazioni delle caratteristiche ondometriche; durante eventi di tempesta. Infatti intensi fenomeni di frangimento sulla cresta delle barre comportano la generazione di una forte corrente al fondo diretta verso il largo

(*undertow*) che determina a sua volta una migrazione della barra *offshore* (Thornton et al., 1996; Gallagher et al., 1998).

Le spiagge erose durante i periodi di intense mareggiate vengono almeno parzialmente rifornite di sedimento mediante il trasporto *onshore*. Tale trasporto e la migrazione verso costa delle barre durante i periodi con condizioni marine meno energetiche (Aubrey, 1979). Secondo Elgar et al. (2001) sembrano essere dovuti alla variazione *cross-shore* dell'asimmetria dei flussi: quando le correnti sono relativamente deboli, ma le velocità orbitali non sono basse, si verifica un trasporto netto associato ai gradienti delle accelerazioni dei flussi asimmetrici. Questi ultimi determinano una migrazione *onshore* della barra fino a fondersi con la spiaggia (Wright and Short, 1984), oppure possono arrestarsi o decadere nella posizione in cui si trovano (Larson and Kraus, 1992; Short and Aagaard, 1993).

Durante stati energetici alti e la fase di migrazione *offshore*, le barre tendono verso una conformazione lineare, quasi bidimensionale. Questo stato è stato chiamato anche *storm profile* da Komar (1998). Quando l'energia del mare diminuisce e le barre migrano verso costa, esse tendono a cambiare nella forma (da bidimensionale a tridimensionale). Lo stato finale è quello di un profilo senza barra, ma con una berma ben formata (profilo riflettivo, Wright and Short, 1984; Lippmann and Holman, 1990), chiamato da Komar (1998) *swell profile* (Fig. 3.6). Generalmente però l'energia non diminuisce abbastanza lentamente da vedere in successione tutti gli stati morfologici.; inoltre tale variabilità è estremamente legata alle caratteristiche locali (Wright and Short, 1984). La conoscenza di queste dinamiche è legata alle numerose osservazioni provenienti da diverse zone tra le quali Duck, North Carolina (USA) (Gallagher et al., 1998), Egmond and Terschelling, Netherlands (Ruessink et al., 2000; Walstra et al., 1994) and Hasaki, Kashima Coast, Japan (Kuriyama, 2002).

Sebbene la risposta morfodinamica delle barre al clima ondoso sia stata ben documentata (Van Enckevort and Ruessink, 2003) la variabilità della posizione della barra da scala stagionale a scala interannuale è spesso maggiore rispetto alla scala substagionale (singole mareggiate). Infatti, ad esempio, Van Enckevort and Ruessink (2003), basandosi su video-monitoraggi da 3 a 5 anni presso Noordwijk (NL), videro che la variabilità della posizione della cresta della barra andava oltre l'anno.

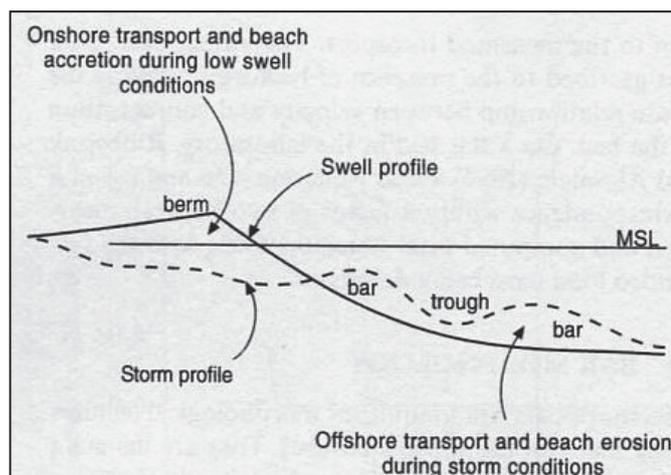


Fig. 3.6 - Profili tipo con e senza barra (Aagaard and Masselink, 1999).

Plant et al. (2006) suggerirono che le variazioni lungo costa della posizione della cresta della barra possono giocare un ruolo fondamentale nell'evoluzione *cross-shore* della posizione della barra. Ad esempio mediante l'osservazione con la stazione ARGUS presso Duck (North Carolina) videro che a seguito dell'uragano Bonnie la barra rettilinea e parallela alla costa iniziò a migrare verso terra fino a diventare fortemente tridimensionale. Questo aumento della variabilità lungocosta, che aumenta con la diminuzione dell'altezza d'onda, sembra essere abbastanza tipico e documentato in diversi articoli come ad esempio da Lippmann & Holman (1990). Plant et al. (2006) videro che le variazioni lungocosta della posizione della barra variavano con la posizione media della barra stessa e ipotizzarono che lo sviluppo di circolazioni orizzontali associate a questa variabilità facilitavano la migrazione *onshore*.

E' stato inoltre evidenziato, in alcune spiagge olandesi e giapponesi, un comportamento in cicli evolutivi, con generazione della barra vicino alla linea di riva, una migrazione netta verso il largo (NOM), che si verifica per periodi superiori all'anno, e un decadimento della morfologia al largo in concomitanza con la generazione di una nuova barra vicino a costa, sebbene sia stata osservata anche una migrazione verso costa a lungo termine (Aagaard et al., 2004). La durata della fase NOM sembra variare da circa un anno nei siti giapponesi (Kuriyama, 2002) ad oltre decenni in diversi siti olandesi (Shand et al., 1999). Inoltre la NOM può avere caratteri episodici, con migrazioni delle barre maggiori verso il largo durante episodi caratterizzati da onde

con altezze elevate alternate a lente migrazioni verso costa tra una mareggiata e l'altra (Lippmann et al., 1993; Plant et al., 1999; Kuriyama, 2002). Nelle spiagge australiane caratterizzate da una sola barra (Wright and Short, 1984; Ranasinghe et al., 2004; Holman et al., 2006) non è stata rilevata alcuna migrazione netta delle barre né *offshore* né *onshore*. Qui il comportamento delle barre sembra essere dominato dalla risposta alle mareggiate più che dalla stagionalità delle condizioni idrodinamiche.

Anche per quanto riguarda il mare Adriatico, studi svolti presso Lido di Dante (Armaroli et al., 2011) hanno evidenziato una barra singola festonata che occasionalmente viene rettificata dalle mareggiate molto energetiche, ma che tende a tornare alla sua morfologia originaria durante i climi ondosi meno energetici. Non è stata però osservata alcuna migrazione, né in risposta alle mareggiate, forse imputabile alla breve durata media, né ciclica, forse perché il ciclo di vita delle barre potrebbe essere superiore alla serie di dati a disposizione. Uno studio della dinamica delle barre svolto invece sul litorale tirreno (Parlagreco et al., 2012) ha evidenziato una migrazione verso il largo della barra dopo una serie di violente mareggiate e la susseguente formazione di una barra sottocosta. Tale risposta morfodinamica a mareggiate molto energetiche è stata osservata anche in altri litorali del mediterraneo (Certain and Barusseau, 2005). Questi ultimi autori proposero, oltre al comportamento NOM indotto solo da eventi di mareggiata estremi (Tr: 20-50 anni), un modello di *Oscillazione attorno ad una Posizione Equilibrio (OPE)* come tipico comportamento delle barre in contesti mediterranei.

Sebbene criteri sulla tipologia, morfologia planimetrica e sulla posizione *cross-shore* siano utili a descrivere i processi che controllano il comportamento delle barre, attualmente essi non sono applicabili a scala globale poiché ancora sono in piedi dibattiti sui meccanismi che ne governano la formazione e lo sviluppo (Wijnberg and Kroon, 2002). È importante sottolineare però che la posizione e la variabilità delle barre hanno importanti implicazioni sulla stabilità a breve e lungo termine della spiaggia. Castelle et al. (2008) notarono infatti che su diverse spiagge della Gold Coast (AUS) si verificarono intensi fenomeni erosivi probabilmente correlati ad una minor protezione della spiaggia da parte della barra più esterna in decadimento.

## **4 Evoluzione morfologica recente del litorale emiliano-romagnolo**

---

La ricostruzione dell'evoluzione del litorale regionale dagli anni '40 al 2000 consente di conoscere le dinamiche agenti sulla fascia costiera, in modo da prevedere quelle future. Partendo da un'analisi del clima meteo-marino è stato dunque affrontato uno studio dell'evoluzione della linea di riva e dei fondali emiliano-romagnoli, focalizzando l'attenzione sulla presenza di barre subtidali naturali e sull'interazione tra queste morfologie e la costruzione di opere difensive.

### **4.1 Il clima meteo-marino**

---

Per individuare la dinamica litoranea che caratterizza la costa dell'Emilia-Romagna, occorre definire le condizioni del moto ondoso incidente. Esso, infatti, è fondamentale per la ricostruzione del regime idrodinamico sottocosta e conseguentemente del trasporto solido litoraneo.

Nell'ambito della redazione del "Piano Costa 1996", una accorta analisi dei dati meteomarini, allora disponibili, ha consentito di definire il clima del moto ondoso al largo, ovvero la frequenza degli eventi suddivisi per altezza d'onda, direzione di provenienza e periodo. Esso prese in considerazione le fonti disponibili quali le piattaforme di perforazione AGIP, tra cui la piattaforma PCB, a circa 20 km da Ravenna, già utilizzata nel primo "Piano Costa 1981" e le osservazioni di navi in transito raccolte dall'Istituto Meteorologico Reale Olandese (KNMI).

Per quanto riguarda la piattaforma PCB, i dati dal 1971 al 1983 sono stati ritenuti affidabili per rappresentare il clima del moto ondoso regionale, poiché ricoprendo un periodo di 13 anni, essi risultano essere significativi dal punto di vista climatologico. Inoltre la boa, essendo ubicata al largo delle coste regionali ed in acque

sufficientemente profonde, fornisce dati rappresentativi del clima marino regionale con effetti di *shoaling* e rifrazione trascurabili (Tab. 4.1).

Secondo tale osservazioni, gli eventi di mareggiata si verificano principalmente da NE-E-SE (Bora–Levante–Scirocco) e questo clima può essere ritenuto rappresentativo del litorale regionale. Soltanto le zone litorali estreme, a Nord e a Sud, risentono della schermatura rispetto ad alcune direzioni. Analizzando la direzione delle ondazioni, si osservano mari regnanti, con maggiore frequenza, da settori compresi tra 60-120° (Levante-Scirocco) e tra 270-300° (Maestrale), il quale però non ha effetti importanti sulle dinamiche litoranee. Per quanto riguarda le ondazioni più energetiche, invece, il settore prevalente è quello tra 30-60° (Bora).

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	0,1	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	1,14	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	-	15,6
300		4,9	4,56	0,49	0,1	0,01	0,02	-	0,01	-	-	10,08
330		3,04	3,32	0,46	0,11	0,01	0,01	-	-	-	-	6,94
<b>TOTALE</b>		<b>10,9</b>	<b>35,6</b>	<b>37,55</b>	<b>8,34</b>	<b>5,21</b>	<b>1,05</b>	<b>0,88</b>	<b>0,24</b>	<b>0,13</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>

Tab. 4.1 - Piattaforma PCB (1971-1983), clima del moto ondoso al largo ricostruito dal "Piano Costa 1996".

I dati KNMI coprono un periodo di 30 anni (1961-1990), sufficientemente ampio per tenere conto delle variabilità climatiche, e sono risultati attendibili da studi eseguiti da Snamprogetti (1986). Da tenere in considerazione però che tali osservazioni visive sono di scarsa attendibilità per quanto riguarda il periodo d'onda. Inoltre la direzione dell'onda viene assunta uguale a quella del vento locale. Tale assunzione è ritenuta sufficientemente accurata, sebbene per eventi da Scirocco si possano

osservare fenomeni di onda lunga da direzione diversa rispetto a quella del vento locale, in funzione della costituzione del bacino Adriatico.

Il confronto con la piattaforma PCB evidenzia una serie di caratteristiche comuni dell'Adriatico settentrionale, come la concentrazione degli eventi di tempesta nei settori direzionali compresi tra 30-150°N, quindi associati ai venti di Bora, Levante e Scirocco.

Tuttavia appaiono delle differenze significative tra i due climi, in quanto secondo il clima KNMI vi è una maggior frequenza di situazioni con mare calmo ( $H_s < 0.5m$ ), circa il 60%, contro il 45% della piattaforma PCB. Inoltre, considerando il totale degli eventi, il KNMI mostra una maggior frequenza degli eventi da NE rispetto ad E e SE, mentre osservando gli eventi di tempesta ( $H_s > 2m$ ) si ha una maggior frequenza degli eventi da tutti e tre i settori, anche se più accentuata da NE e SE.

Hs (m) Dir (°)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	TOT%
0	4,435	1,807	0,81	0,374	0,177	0,083	0,042	0,021	0,01	-	7,758
30	4,611	2,254	1,236	0,706	0,415	0,239	0,145	0,083	0,052	0,031	9,773
60	6,501	2,918	1,36	0,644	0,301	0,145	0,073	0,031	0,021	0,01	12,005
90	4,102	2,025	1,059	0,561	0,301	0,166	0,093	0,052	0,031	0,01	8,402
120	5,276	1,194	0,987	0,53	0,291	0,166	0,104	0,062	0,031	0,021	9,451
150	9,678	2,783	1,215	0,592	0,312	0,166	0,093	0,52	0,31	0,21	14,944
180	4,3	1,34	0,519	0,218	0,93	0,042	0,021	0,01	-	-	6,543
210	3,116	0,904	0,249	0,073	0,21	0,01	-	-	-	-	4,372
240	3,053	0,924	0,374	0,166	0,83	0,042	0,021	0,01	-	-	4,673
270	3,271	0,644	0,26	0,125	0,062	0,31	0,021	0,01	0,01	-	4,435
300	4,32	1,641	0,748	0,363	0,177	0,093	0,052	0,021	0,01	0,01	7,436
330	7,633	1,672	0,561	0,208	0,083	0,031	0,01	0,01	-	-	10,209
<b>TOTALE</b>	<b>60,297</b>	<b>20,895</b>	<b>9,378</b>	<b>4,559</b>	<b>2,316</b>	<b>1,215</b>	<b>0,675</b>	<b>0,363</b>	<b>0,197</b>	<b>0,104</b>	<b>100</b>

Tab. 4.2 – Clima KNMI settore italiano. Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per settore di provenienza (Idroser, 1996).

Infine osservando stati di mare con  $H_s < 1m$ , secondo i dati KNMI la frequenza delle osservazioni è di circa l'81% e secondo la piattaforma PCB è circa il 76%.

## 4.2 L'evoluzione della linea di riva

---

La linea di riva è spesso utilizzata come parametro di riferimento per individuare lo stato di “salute” di un litorale, considerata un indicatore che permette di valutare il trend evolutivo delle spiagge, in termini di perdita e acquisizione di suolo per effetto di tutte le cause dirette e indirette che agiscono in prossimità della costa.

### 4.2.1 Strumenti e metodi

---

Lo studio dell'evoluzione storica della linea di riva e dei fondali, esteso all'intero litorale regionale, si avvale dei rapporti redatti da Idroser per il “Piano Costa 1981” e “Piano Costa 1996” e delle attività svolte dalla Regione Emilia Romagna ed ARPA (RER, 2009; RER, 2000, Sistema mare-costa, RER), integrati con diversi studi eseguiti sul litorale (Ciabatti et al., 1978; Bondesan et al., 1979). Sono inoltre state analizzate le variazioni della linea di riva, ricavate mediante foto interpretazione sulle foto aeree del 1954-55, 1976-78, 1982, 1992, 2000 rese disponibili dalla Regione Emilia-Romagna e confrontate attraverso l'applicazione dello strumento DSAS® (*Digital Shoreline Analysis System*) creato dall'USGS in ambiente ArcGIS 9.3 (ESRI®).

Il DSAS si basa sul metodo di linee o transetti perpendicolari ad una linea definita baseline in posizione più arretrata rispetto alle linee di riva in esame. Esse, intersecando le varie linee di riva, forniscono la misura delle variazioni della posizione nel tempo; questi dati forniscono di per sé importanti informazioni e si prestano ad elaborazioni statistiche per la definizione dei tassi di variazione (Thieler et alii, 2005).

Il computo dello spostamento planimetrico della linea di riva è stato eseguito lungo 219 transetti con interasse di 500 m, interessando un tratto costiero di circa 110 Km, da Lido di Volano (FE) a Cattolica (RN) (Fig. 4.1).

E' necessario però fare alcune considerazioni sul metodo utilizzato per l'interpretazione della posizione e sulla precisione del dato. La definizione della posizione della linea di riva definita come limite “asciutto-bagnato” (Dolan et alii, 1980) non è infatti così semplice. Tale posizione varia continuamente nel tempo, in

funzione dei movimenti sia *cross-shore* che *longshore* del sedimento ma soprattutto della natura dinamica del livello del mare sulla costa (onde, maree, sovrizzo d'onda durante le mareggiate, *setup* e *runup*). La posizione della linea di riva è dunque un parametro istantaneo e non una media (Morton, 1991; Boak and Turner, 2005), fortemente affetto dalle condizioni al contorno nel momento della ripresa fotografica.

In letteratura esistono molteplici criteri per la rappresentazione della linea di riva, in base alla qualità delle foto che a sua volta dipende dalla quota di volo, dall'accuratezza, ecc. (Li et alii, 2001).

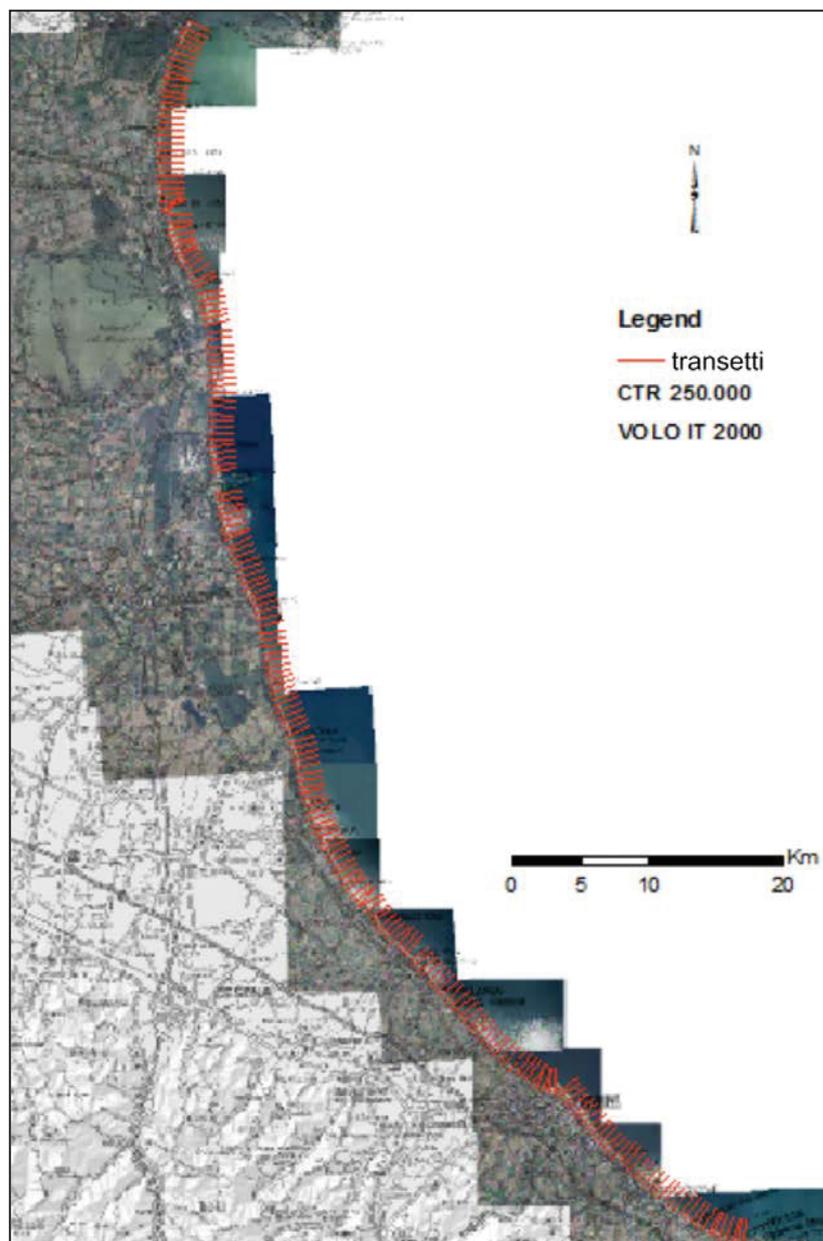


Fig. 4.1 – Trasetti sulla base dei quali è stato eseguito il calcolo delle variazioni delle linee di riva.

Per la digitalizzazione della linea di riva da foto aeree è importante ricordare che la precisione nella digitalizzazione risente obbligatoriamente di approssimazioni dovute al fatto che, in coste basse, le variazioni anche piccole del livello del mare (dovute alle maree) hanno effetti sulla posizione della linea di costa piuttosto visibili. Occorrerebbe quindi conoscere sempre l'ora in cui sono stati scattati i fotogrammi, le misurazioni di un mareografo e di un barometro per poter effettuare le correzioni di marea e pressione alle foto aeree che vengono digitalizzate. Oltre a questi valori, è importante conoscere la pendenza della spiaggia in diversi punti: infatti la linea asciutto-bagnato subisce uno spostamento non trascurabile su pendenze diverse.

Non può, inoltre, essere trascurata la risoluzione della foto e la corretta georeferenziazione: dunque è importante conoscere il numero dei pixel a terra delle foto aeree e il numero dei punti riferiti a opere antropiche o quant'altro possa essere utilizzabile come riferimento per la georeferenziazione. Non è da sottovalutare poi la scala cartografica utilizzata per il tracciamento della linea (errore di graficismo). Quest'ultimo si commette tracciando una linea nella fase di creazione di una carta: ad esempio, in una carta con scala 1:N è stimato di almeno  $0.2 \cdot N$  mm. A questi errori vanno poi aggiunti quelli dovuti all'imprecisione dell'operatore, che aumentano con l'aumentare del rapporto di scale (Bernhardsen, 1992).

I risultati ottenuti sono stati confrontati ed integrati con l'analisi effettuata da Idroser (1981, 1996), al fine di avere un quadro piuttosto corretto delle tendenze evolutive all'avanzamento o all'arretramento dell'intero tratto regionale. Analizzando inoltre i tassi di variazione della linea di riva, ossia gli avanzamenti/arretramenti tra due diversi rilievi mediati per l'intervallo di tempo intercorso, è stato possibile fare alcune considerazioni sui trend principali in atto.

E' importante sottolineare che non si possono trascurare gli apporti sedimentari derivanti da ripascimenti artificiali. Gli interventi di movimentazione della sabbia, come ripascimenti e prelievi di materiale da aree in accumulo, hanno reso difficoltosa la corretta interpretazione delle dinamiche evolutive della linea di riva dal 1983, anno di esecuzione del primo intervento di ripascimento in Emilia-Romagna.

#### 4.2.2 Analisi della variazione della linea di riva dal 1943 al 2000

L'analisi del litorale regionale è partita dalla suddivisione dell'intera fascia costiera in 7 celle, separate tra loro da moli portuali o foci fluviali (Fig. 4.2).



Fig. 4.2 – Suddivisione del litorale emiliano-romagnolo in 7 celle.

##### Cella I - Lido di Volano – Porto Garibaldi

Nel periodo '43-'55, mentre ancora il tratto costiero di Lido di Volano e Lido delle Nazioni è in avanzamento, il litorale più a Sud, fino a Porto Garibaldi è andato in arretramento, tanto da richiedere la costruzione di 3 barriere frangiflutti (1957).

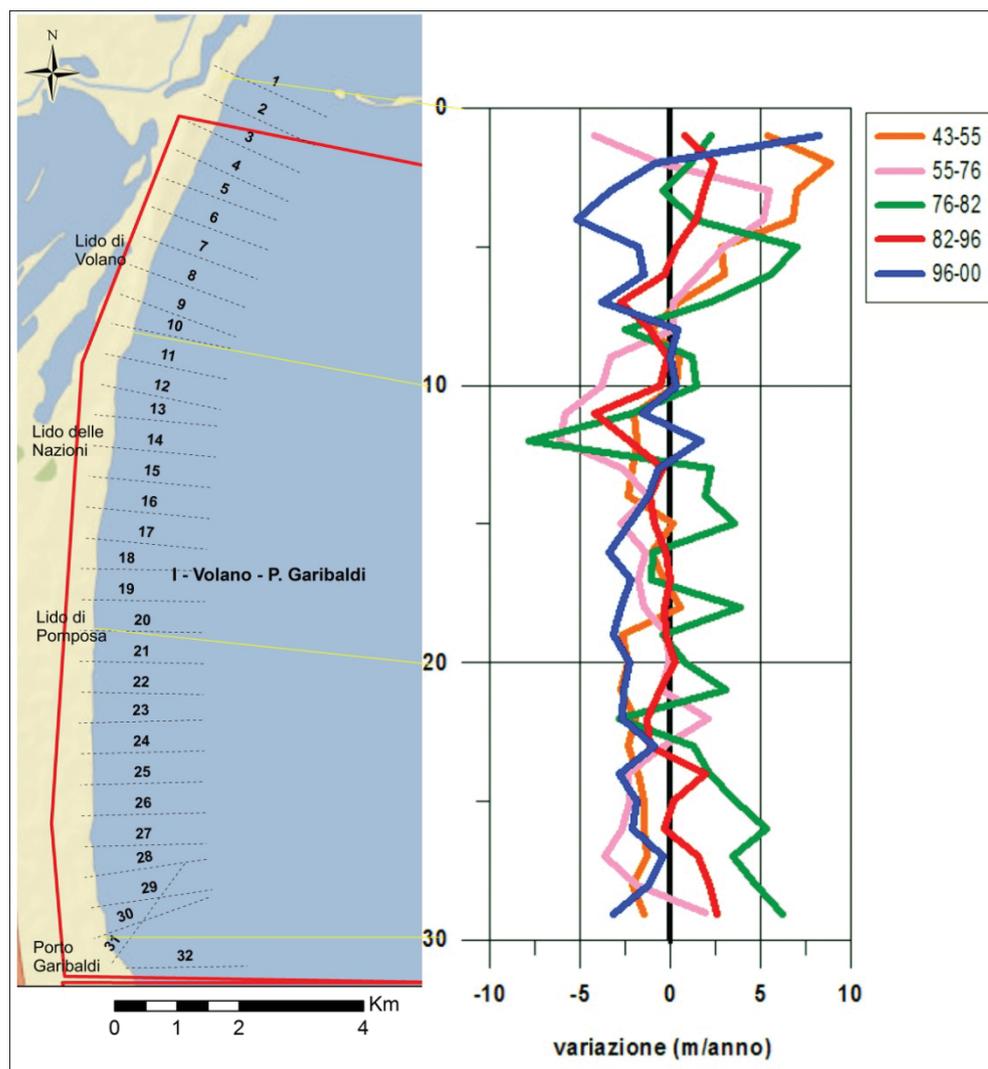


Fig. 4.3 – Tasso di variazione della linea di riva della Cella I per il periodo 1943 – 2000.

Il fenomeno erosivo si aggrava fino agli anni '60, tanto da richiedere la costruzione di nuove barriere foranee: infatti negli anni '70 l'erosione si è ridotta (confr. '55-'76, Fig. 4.3), probabilmente per la progressiva estensione delle scogliere verso Nord (lunghezza totale circa 9 km). La spiaggia così protetta mostra un trend generalmente positivo, ma l'erosione sembra essersi spostata più a Nord (Lido delle Nazioni), non protetto dalle barriere (confr. '76-'82, Fig. 4.3), e più tardi ancora di fronte alla pineta di Lido di Volano e nella zona della Bocca del Bianco, dove sono state realizzate scogliere radenti (confr. '82-'96 e '96-2000, Fig. 4.3).

Cella II - Lido degli Estensi – Foce Reno

Il litorale a Sud di Porto Garibaldi beneficia dei sedimenti che, asportati dalla foce del Fiume Reno, vengono trasportati verso Nord ed intercettati dal molo Sud, comportando un avanzamento della linea di riva. Il litorale di Lido degli Estensi e Lido di Spina evidenziano dunque un trend positivo già nel periodo '43-'55 (Fig. 4.4), mentre a Sud del Canale Bellocchio si osserva un trend negativo con tassi erosivi massimi di -25 m/anno; anche la foce del Reno è in erosione con arretramenti medi di -10 m/anno.

I trend rilevati continuano nel decennio successivo, ma la zona in erosione si estende fino al tratto Sud di Lido di Spina e nel periodo '76-'82 registra il suo massimo tasso di arretramento (Fig. 4.4). Nei periodi seguenti vi è un ritorno ai tassi di avanzamento (+5 m/anno) ed arretramento (-8 m/anno) che caratterizzavano le due porzioni di litorale precedentemente. Sono gli ultimi quattro anni osservati a mostrare un'inversione di tendenza per quanto riguarda il tratto tra Lido degli Estensi e Lido di Spina (Canale Logonovo): si osservano infatti tassi erosivi intorno a -5 m/anno (confr. '96-2000, Fig. 4.4).

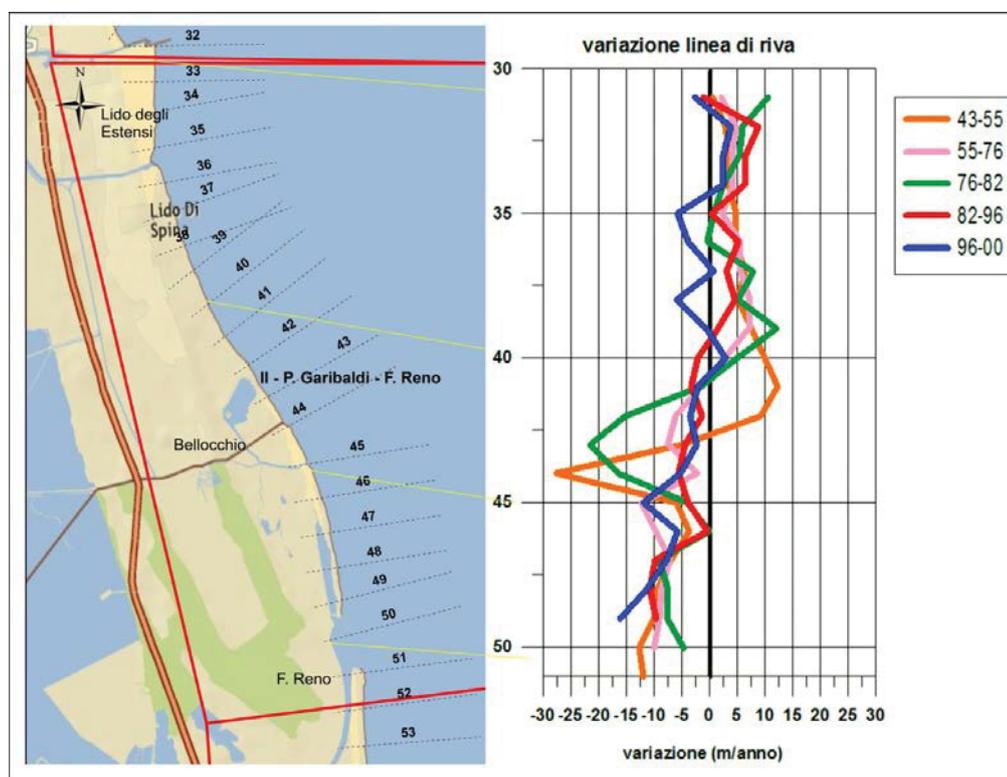


Fig. 4.4 - Tasso di variazione della linea di riva della Cella II per il periodo 1943 – 2000.

Cella III - Foce Reno – Porto Corsini

Il tratto tra la foce del Fiume Reno e Casalborgsetti è legato all'evoluzione della cuspide del fiume Reno, in erosione dagli anni '30. L'erosione della sua foce, in media - 8 m/anno fino alla foce del Lamone, comporta presso l'abitato di Casalborgsetti. la realizzazione di difese gabbioni nel 1965. La linea di riva qui mostra subito gli effetti locali delle opere, con avanzamento nella zona di intervento ed erosione nelle zone adiacenti (confr. '55-'76, transetto 60, Fig. 4.5).

Il litorale tra la foce del Lamone e Porto Corsini mostra un lieve trend positivo ma costante di avanzamento (+2-3 m/anno): infatti la realizzazione dei moli di Porto Corsini, intercettando i sedimenti trasportati dalla deriva litoranea in questa zona diretta verso Sud hanno determinato l'avanzamento della linea di riva.

Questi trend si mantengono costanti nel tempo, ma una nota deve essere fatta in merito al tratto presso il Poligono Militare di tiro, dove, negli anni '80, è stata realizzata una difesa aderente.

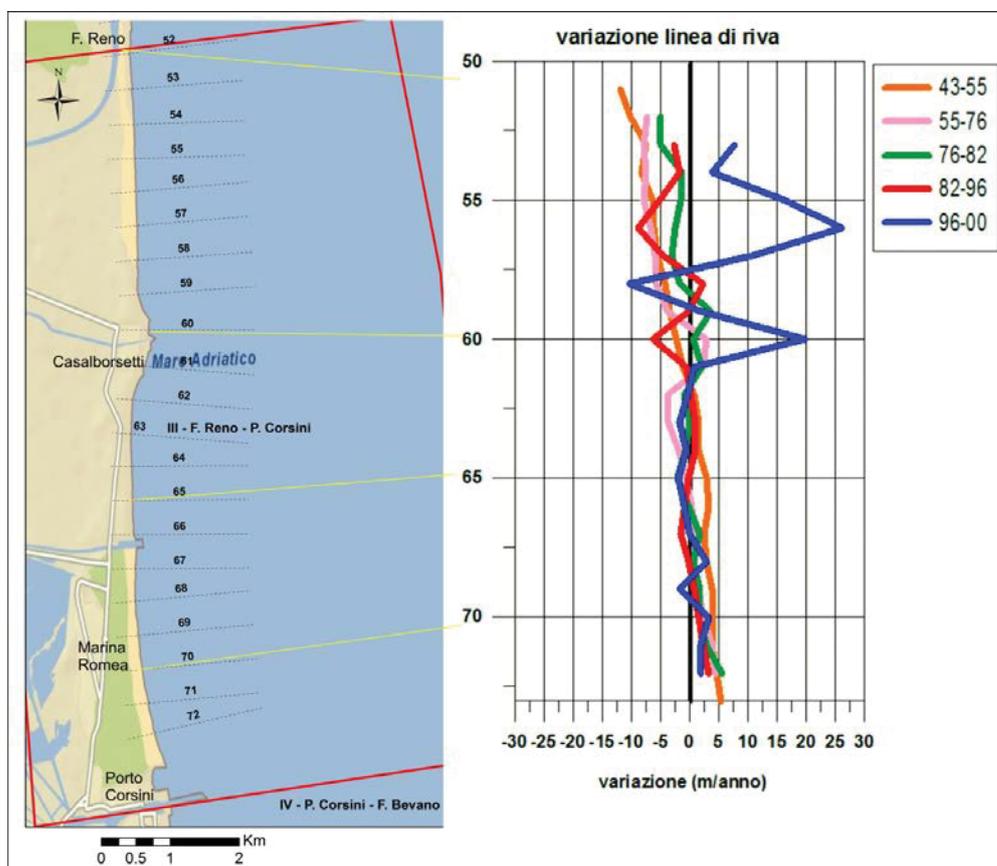


Fig. 4.5 - Tasso di variazione della linea di riva della Cella III per il periodo 1943 – 2000.

A seguito di tale costruzione, la linea di riva del 2000 registra una posizione di circa 100 m più avanzata rispetto al 1996 (Fig. 4.5). Al contrario, il litorale tra il Poligono e Casalborsetti (a Nord delle barriere) mostra trend erosivi con un tasso che raggiunge i -10 m/anno.

Cella IV - Marina di Ravenna - Foce Bevano

Anche questo tratto, a Sud del molo di Porto Corsini, si osserva un trend in costante avanzamento, beneficiando dei sedimenti trasportati dalla corrente *longshore* verso Nord. Però, mentre nei decenni scorsi il trend positivo si estendeva fino a Sud dell'abitato di Punta Marina, invertendosi soltanto più a Sud, in corrispondenza di Lido Adriano e fino alla foce di Fiumi Uniti (-8 m/anno) (confr. '43-'55, Fig. 4.6).

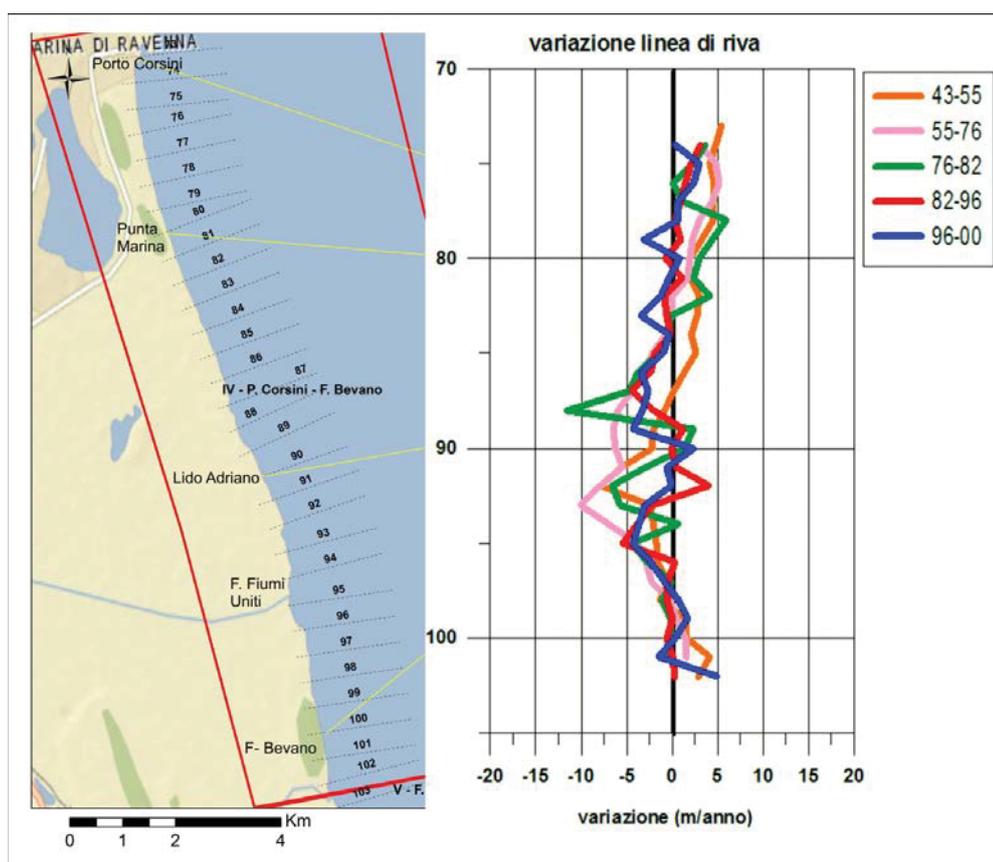


Fig. 4.6 - Tasso di variazione della linea di riva della Cella IV per il periodo 1943 – 2000.

Il fenomeno erosivo si estende progressivamente verso Nord con un tasso di arretramento della linea di riva fin oltre i 5 m/anno presso Punta Marina e Lido Adriano (confr. '55-'76, Fig. 4.6), sebbene presso quest'ultimo siano stati realizzati dei pennelli. Per tale ragione dal 1978 inizia la realizzazione delle barriere in sacchi da Lido Adriano Nord fino a Punta Marina che però non hanno i risultati attesi e di barriere parallele emerse a protezione dell'abitato di Lido Adriano.

Il trend erosivo continua in prossimità dell'abitato di Punta Marina per cui, tra il 1988 ed il 1991, è stato realizzato un notevole intervento di ripascimento accompagnato dalla realizzazione di barriere in massi a sostituzione di quelle in sacchi, che comunque non hanno fatto altro che spostare l'erosione man mano che venivano estese verso Nord (arretramenti medi di circa -2 m/anno, confr. '96-2000, Fig. 4.6), così come il tratto in prossimità della foce dei Fiumi Uniti (-4 m/anno).

#### Cella V - Foce Bevano – Porto Canale di Cesenatico

Tra la foce del Bevano e Lido di Classe si osserva un trend positivo della linea di riva, lungo tutto il tratto in esame (in media 2 m/anno), con soltanto il tratto in prossimità della foce del Fiume Savio in erosione (-1 m/anno) (confr. '43-'55, Fig. 4.7). L'avanzamento però nel decennio successivo si inverte presso Lido di Classe e presso il molo di Cesenatico. La costruzione di barriere presso la foce del Savio (Lido di Savio e Lido di Classe) mostra gli effetti locali con , con avanzamento in corrispondenza della zona di intervento ed erosione nelle zone adiacenti (confr. '76-'82, Fig. 4.7).

In questo periodo, sia il litorale a Sud della foce del Bevano che tutto il tratto fino a Cesenatico mostrano fenomeni erosivi, con tassi di arretramento medi della linea di riva di circa -3 m/anno. Successivamente, mentre il litorale di Lido di Classe è caratterizzato da un costante trend di avanzamento della linea di riva (3 m/anno, confr. '82-'96, Fig. 4.7). Sempre in questo periodo, presso Milano Marittima è stato realizzato un ripascimento artificiale nel 1983 protetto con barriere in sacchi sommerse e con due pennelli. Tale tratto si osserva stabile nel primo periodo dopo l'intervento, ma tra il '96 ed il 2000 torna in erosione (-2 m/anno).

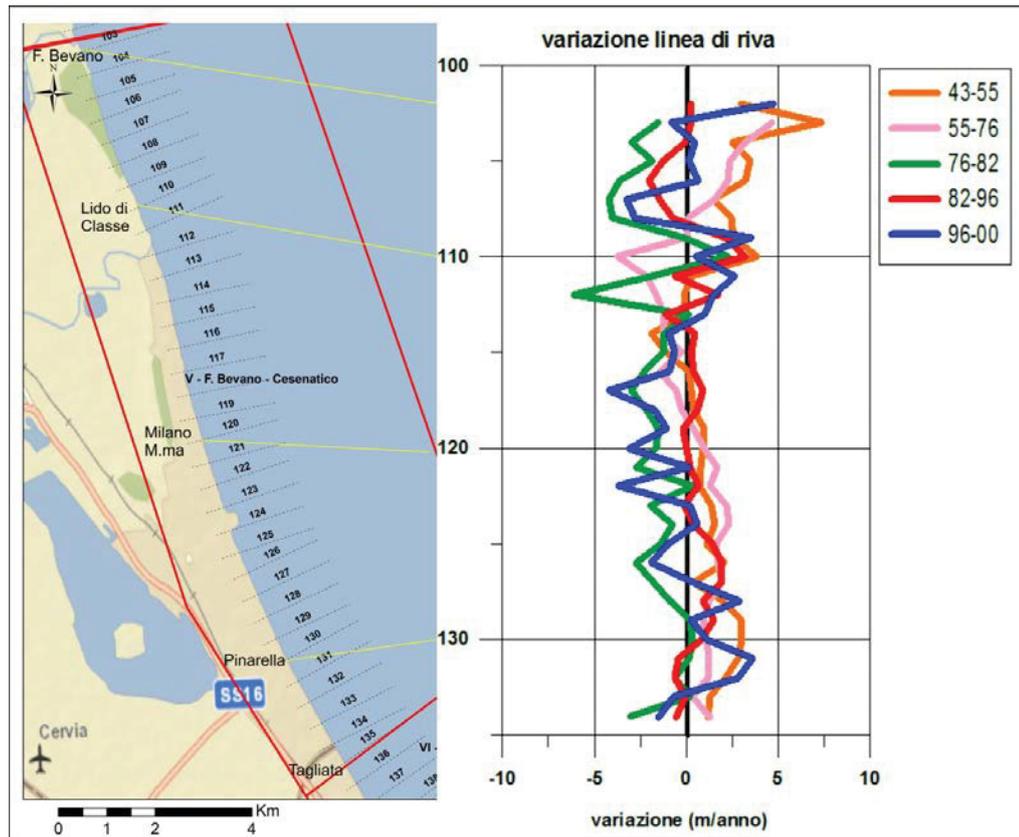


Fig. 4.7 - Tasso di variazione della linea di riva della Cella V per il periodo 1943 – 2000.

#### Cella VI - Cesenatico – Rimini Nord

Questa cella è caratterizzata da un arretramento di quasi tutto il tratto costiero già negli anni '43-'55 (Fig. 4.8): tra Gatteo a Mare a Igea Marina, così come a Nord del porto di Rimini si osserva un arretramento della linea di riva medio di -2 m/anno, tanto che a Nord del porto di Rimini vengono realizzate delle scogliere in prossimità di quelle di Viserba e Viserbella. Col tempo si intensificano i fenomeni erosivi così vengono realizzate altre barriere che man mano si estendono verso Nord.

Il litorale a Sud dei moli di Cesenatico negli anni '80 è quindi completamente difeso da barriere parallele emerse. Tale tratto è stato interessato dal succedersi di avanzamenti ed arretramenti connessi con il progredire verso nord della costruzione delle scogliere. Presso Gatteo dopo la realizzazione delle opere ed il versamento di sedimento dragato dalla foce del Rubicone si osservano avanzamenti della linea di riva (confr. '82-'96, Fig. 4.8).

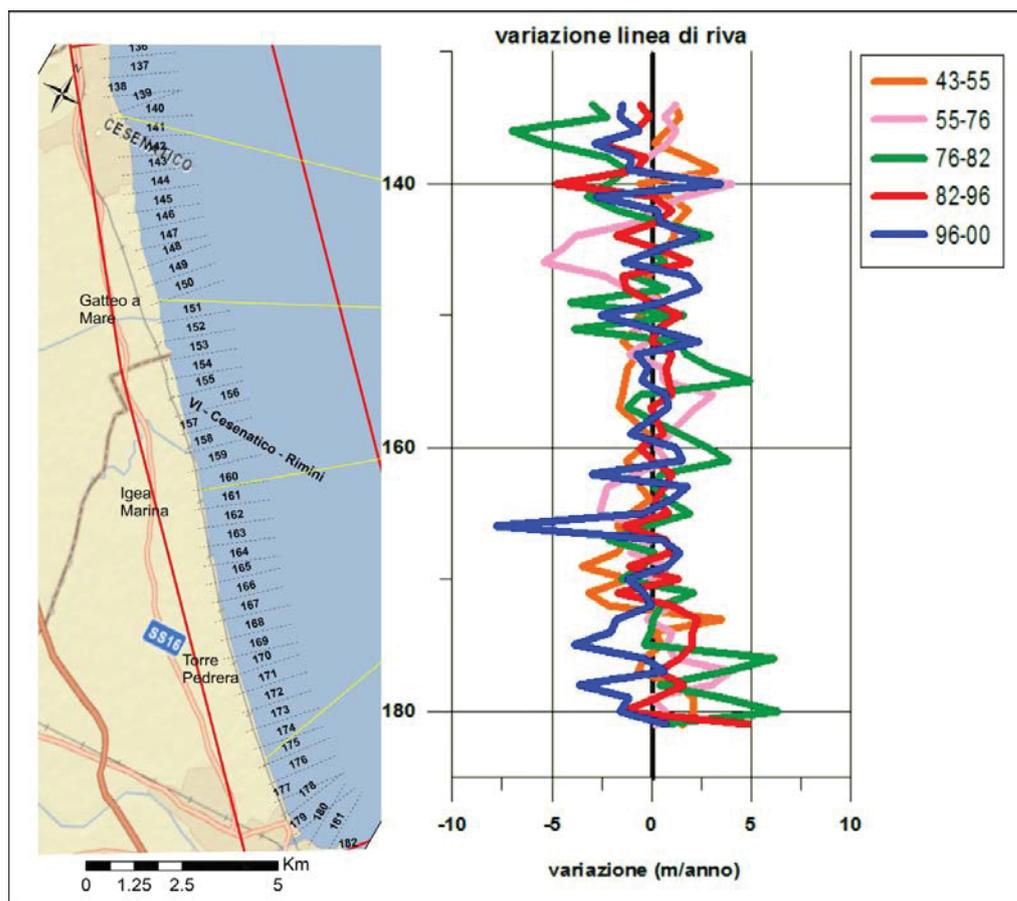


Fig. 4.8 - Tasso di variazione della linea di riva della Cella VI per il periodo 1943 – 2000.

I litorali di Savignano, S. Mauro e Bellaria, sebbene già protetti da una serie di barriere foranee, poiché continuavano ad arretrare, hanno beneficiato dei sedimenti prelevati dietro alle scogliere e portati a ripascimento. Il litorale a Nord di Rimini, dopo lo spostamento delle barriere verso il largo negli anni '89-'90 per migliorare la qualità delle acque, mostra avanzamenti della linea di riva oltre i 30m. Perciò all'anno 2000 il tratto litoraneo mostra una generale stabilità probabilmente legato al continuo apporto di sedimento nei vari ripascimenti eseguiti; si osservano trend erosivi soltanto tra Igea Marina e Torre Pedrera (-8 m/anno) e presso Viserba (-4 m/anno).

Cella VII - Rimini Sud – Cattolica

I litorali a Sud del molo del porto di Rimini fino al porto di Riccione evidenziano un avanzamento costante della linea di riva (+1,5 m/anno), mentre l'erosione prima concentrata alla foce del Conca comincia ad estendersi nel periodo '44-'55 a Cattolica e Misano (Fig. 4.9). Tale trend continua fino agli anni '70 quando a Misano vengono costruiti pennelli che comunque non riescono ad apportare beneficio alla spiaggia, mentre a Cattolica si completa la costruzione di barriere verso Nord, iniziata nel '61.

Mentre il tratto settentrionale continua a registrare un avanzamento della linea di riva (+2,5 m/anno), a Misano l'erosione raggiunge anche i -6 m/anno (confr. '76-'82, Fig. 4.9). Effetto opposto della realizzazione di opere si osserva a cattolica, con un avanzamento di circa 2 m/anno della linea di riva.

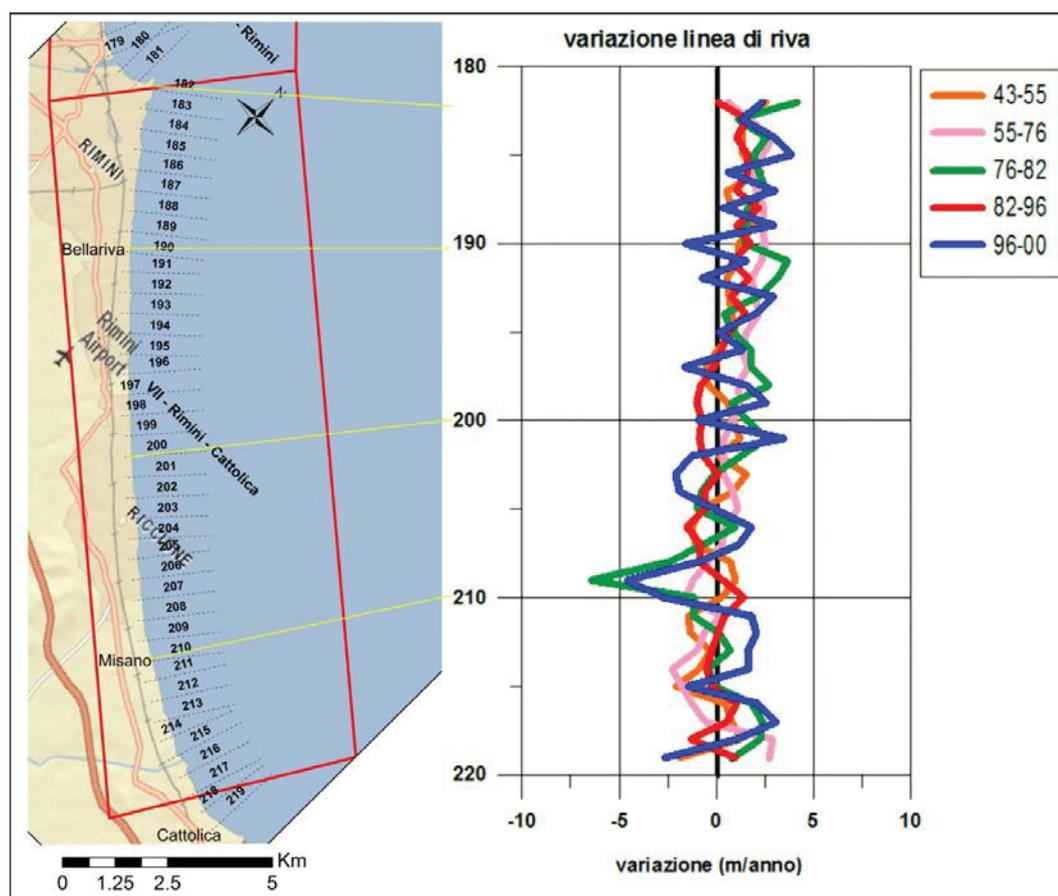


Fig. 4.9 - Tasso di variazione della linea di riva della Cella VII per il periodo 1943 – 2000

A differenza del tratto a Sud del molo di Rimini, privo di opere, il quale mostra un costante avanzamento della linea di riva (2 m/anno), il litorale di Riccione nel periodo 1982-1996 è interessato da fenomeni erosivi che hanno determinato un arretramento di circa 20 m della linea di riva. I limitati interventi di ripascimento non hanno tamponato il fenomeno che si è esteso verso Nord, così come a Misano. Qui nel 1983 è stato eseguito un intervento di ripascimento protetto da barriere in sacchi sommerse che ha apportato benefici alla spiaggia ed ad una stabilizzazione della linea di riva per alcuni anni. Chiaramente la mancata manutenzione però ha determinato il ritorno dei fenomeni erosivi.

### 4.3 L'evoluzione dei fondali

---

L'evoluzione della porzione sommersa della spiaggia riveste una grande importanza nella dinamica dell'intero sistema costiero, testimoniato dal fatto che i processi erosivi costieri si originano in primo luogo proprio sui fondali, per poi estendersi verso la spiaggia emersa, con conseguente arretramento della linea di riva.

L'analisi della spiaggia sommersa deve prendere in considerazione diversi parametri descrittivi fondamentali per la comprensione dell'evoluzione morfodinamica, come la presenza di barre sommerse e le loro caratteristiche quali la distanza da costa, l'altezza la larghezza della base, la profondità della cresta, ma anche la pendenza media dei fondali.

Mentre le informazioni sulla variazione della spiaggia emersa possono essere più facilmente raccolte grazie a strumenti quali l'interpretazione di foto aeree o di carte storiche, spesso disponibili alla consultazione, la raccolta di dati relativi alla porzione sommersa è ben più ostica. La disponibilità di rilievi batimetrici è infatti piuttosto limitata e spesso le mappe consultabili sono cartacee. Inoltre, i dati dei rilievi eseguiti nel passato non sono raccolti da una unica amministrazione, ma spesso è necessario risalire all'amministrazione locale o all'ente di ricerca che li ha acquisiti.

Lo studio effettuato sui fondali si propone di descrivere l'assetto batimetrico dei fondali emiliano-romagnoli utilizzando i dati reperiti dagli anni '60 al 2000. L'attenzione

è stata focalizzata sulla presenza delle barre, poiché esse rappresentano una riserva di sabbia e sono in grado di modificare la risposta del sistema costiero alle diverse condizioni ondometriche. La posizione e la variabilità di queste morfologie hanno importanti implicazioni sulla stabilità a breve e lungo termine della spiaggia (Grunnet and Ruessink, 2005). Proprio per tali ragioni la quantificazione delle loro variazioni morfologiche può essere la chiave per la comprensione dei processi che controllano la morfologia di tutto il sistema costiero.

#### 4.3.1 Strumenti e metodi

---

Lo studio del fondale emiliano-romagnolo è stato eseguito a partire da una ricerca dei dati batimetrici disponibili e consultabili. Sono stati consultati rilievi batimetrici degli anni '60, '70, '80, '90 e 2000, per lo più su mappe e sezioni cartacee. Il primo rilievo disponibile è quello eseguito dal CNR nel 1968 e reso consultabile presso l'Università di Padova. I rilievi degli anni '70, '80, '90 sono stati reperiti presso l'Autorità Portuale di Ravenna, ex- Genio Civile Opere Marittime, il Comune di Ravenna ed il Servizio Tecnico di Bacino Po di Volano e della costa, ma non coprono l'intero litorale. Infine i rilievi del 2000 sono stati resi consultabili presso ARPA Emilia-Romagna.

Le coordinate planimetriche del picchetto di ancoraggio di ciascuna sezione *cross-shore* di rilievo sono state trasformate nel sistema di riferimento utilizzato dalla Regione Emilia Romagna, European Datum ED50 UTM 32\* (*False Northing* - 4.000.000,000). In tal modo è stato possibile analizzare le sezioni comuni per i diversi anni disponibili e valutare la loro effettiva evoluzione nel tempo. Non potendo digitalizzare tali dati, si è provveduto alla creazione di un database alfanumerico in cui sono state raccolte informazioni sulla presenza delle barre sommerse e sulle loro caratteristiche morfometriche. Sono state raccolte altresì informazioni sulla pendenza media dei fondali e sulla presenza e sull'ubicazione delle opere di difesa.

Tali informazioni sono state analizzate, cartografate e rappresentate in grafici al fine estrapolare trend e/o correlazioni.

La presenza e le caratteristiche delle barre nei fondali emiliano-romagnoli è stata analizzata suddividendo il litorale in celle, come già fatto per l'analisi della variazione della linea di riva. Sono state selezionate le sezioni comuni dagli anni '60 al 2000, fatta eccezione per il tratto ferrarese e il tratto ravennate tra Punta Marina Sud e Foce Bevano, in cui non si hanno informazioni relative agli anni '70.

Le sezioni sono state dunque denominate con lo stesso codice utilizzato dalla Regione Emilia Romagna e corredate del toponimo relativo al sito di ubicazione.

La prima operazione è stata quella di identificare le sezioni in cui erano o meno presenti le barre. Sono state quindi elaborate delle mappe schematiche rappresentanti l'anno di riferimento (colore) e la presenza o l'assenza (linea tratteggiata/continua).

Individuati i tratti in cui la barra era presente, sono stati analizzati i relativi parametri morfometrici suggeriti da Grunnet and Hoekstra (2004): altezza della barra ( $H_b$ ), larghezza della base ( $L_b$ ), profondità della cresta rispetto al livello medio marino misurato a quel tempo ( $P_c$ ), profondità della base ( $P_b$ ), distanza della cresta della barra dalla linea di riva ( $D_c$ ) ed area in sezione ( $A$ ) (Fig. 4.10). E' stata analizzata la loro evoluzione nel tempo, in funzione della variazione dei vari parametri morfologici, dell'assetto dei fondali e dell'eventuale realizzazione di opere di difesa (barriere foranee o aderenti, pennelli, barriere in sacchi, ripascimenti).

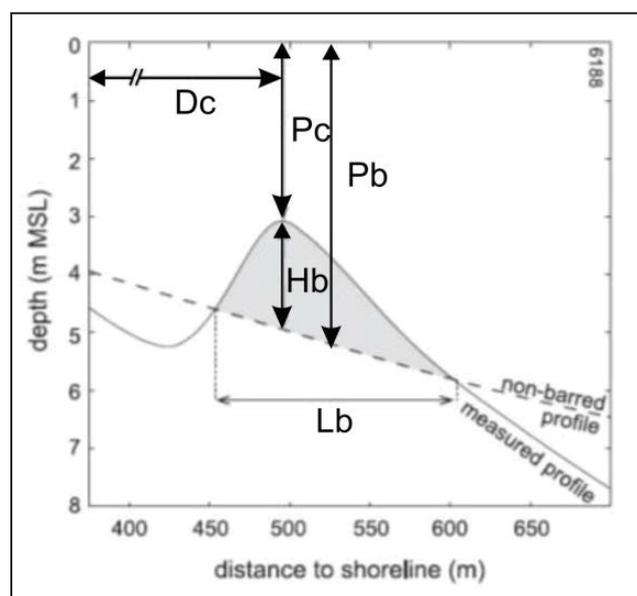


Fig. 4.10 - Parametri morfometrici delle barre sommerse (Grunnet & Hoekstra, 2004).

Le informazioni relative alle opere difensive ed ai ripascimenti eseguiti, sono state tratte dal Catalogo delle opere di difesa della Regione Emilia-Romagna (Perini e Lorito, 2007), dal Rapporto sullo “Stato del litorale emiliano-romagnolo all’anno 2007 e piano decennale di gestione” (ARPA, 2009) e dai rapporti IDROSER (1981, 1996). Per quanto riguarda la realizzazione di ripascimenti della spiaggia emersa e intertidale, purtroppo le informazioni sono piuttosto discontinue e non hanno permesso una correlazione tra il versamento di sabbia e un'eventuale formazione di barre.

Infine, è stata analizzata la variazione di posizione delle isobate dei 5 m e degli 8 m, al fine di valutare l'evoluzione della profondità dei fondali e quindi la variazione della loro pendenza nell'intervallo di tempo considerato.

#### 4.3.1 Le barre sommerse in Emilia Romagna

---

##### *Cella I - Lido di Volano – Porto Garibaldi*

Per quanto riguarda la cella 1 (Fig. 4.11), i dati reperiti sono abbastanza completi, sebbene non si hanno informazioni relativamente agli anni '70, mentre si vanta una buona copertura relativamente ai rilievi degli anni '60, '80, '90 e 2000.

I fondali presso Lido di Volano registrano un'assenza costante delle barre, fatta eccezione per il rilievo degli anni '90 in cui si osserva la presenza di una barra a circa 190 m dalla costa, ubicata alla profondità di -2,2 m, ma riscontrata su una sola sezione. In questo tratto la pendenza del fondale tra la linea di riva e la batimetrica dei 6 m è di circa 0,13°, pressoché invariata per tutto il periodo analizzato.

Nel rilievo del 1968, quando probabilmente le barriere si estendevano fino al confine tra il Lido di Pomposa e quello di Nazioni, si osserva la presenza di una barra sommersa presso Lido delle Nazioni (ancora libero). Tale barra, ubicata alla profondità di circa -2 m, ha un'altezza modesta (0,5 m), e dista 115 m dalla costa.

Dopo 20 anni soltanto lungo una sezione presso Lido delle Nazioni Nord si osserva la presenza della barra, ma di dimensioni inferiori ed ubicata attorno a -3,5 m di profondità, oltre le barriere foranee. In un'altra sezione presso Lido degli Scacchi è

presente una barra, sia nel rilievo del '68 che dell'84: essa nel primo rilievo aveva un'altezza di circa 0,5 m ed era ubicata attorno a -1,9 m di profondità (Dc 120 m), mentre nel secondo rilievo raddoppia la sua altezza, attestandosi alla profondità di -2,1 m, attraverso il varco e oltre le barriere foranee (Dc 250 m).

Questo tratto di litorale presenta una pendenza media di 0,35° che è rimasta invariata nei 32 anni analizzati.

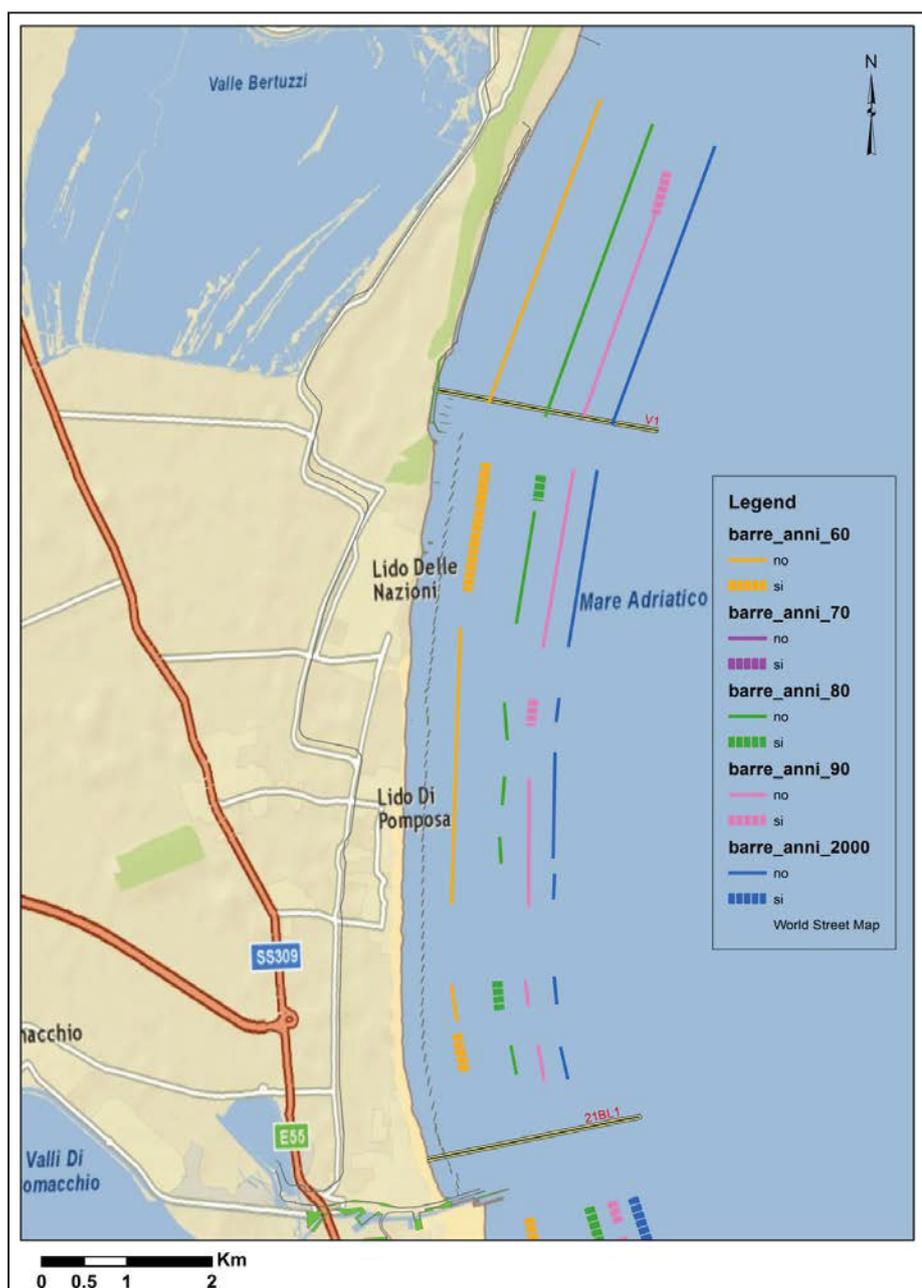


Fig. 4.11 – Cella 1 – Lido di Volano – Porto Garibaldi.

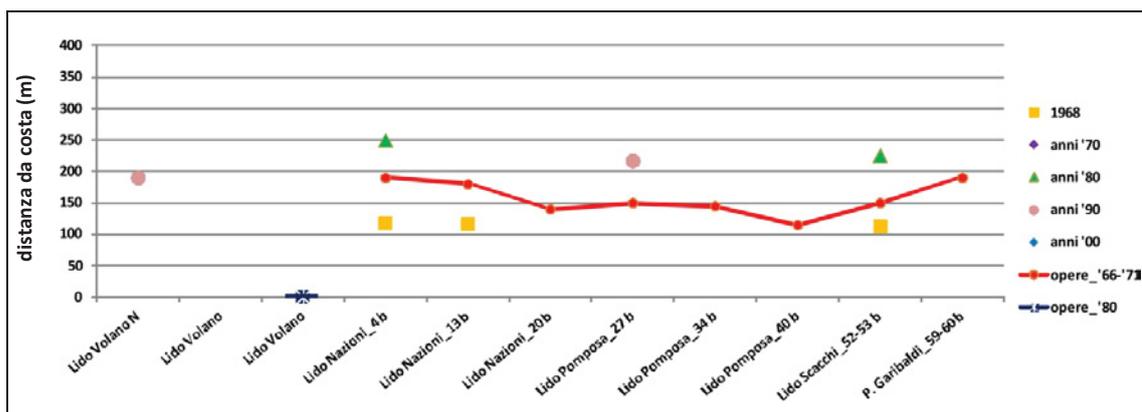


Fig. 4.12 –Cella 1 - Distribuzione *cross-shore* delle barre rilevate dal '68 al 2000 ed eventuale presenza di opere di difesa rigide (linea continua).

### Cella II - Lido degli Estensi – Foce Reno

Per quanto riguarda la cella 2, non vi sono informazioni relative agli anni '70 per il tratto ferrarese compreso tra Lido degli Estensi e Foce Reno, mentre il tratto tra Lido di Spina Sud e Foce Reno non sono disponibili i dati relativi agli anni '80.

L'intero tratto risulta essere privo di opere di difesa di tipo rigido, ma le barre sono presenti in maniera piuttosto continua per tutto il periodo. Si osservano barre con altezze tra 0,6 e 0,8 m attorno alle profondità di -2,3 e -3,1 m a partire dagli anni '60. In corrispondenza delle zone in cui la barra ha dimensioni maggiori si osserva una seconda barra, ubicata più al largo ma di modeste dimensioni (altezza 0,35 m, profondità -4 m).

Negli anni '80 si osservano le stesse caratteristiche osservate in precedenza, con barre ben sviluppate alte mediamente 0,7 m e ubicate alle profondità tra -1,5 e -3 m; in corrispondenza di Lido di Spina sono presenti due ordini di barre di cui però la più interna con dimensioni inferiori (0,4 m) rispetto a quella esterna (0,75 m) che si trova alla profondità di -2,7 m. Negli anni '90 e nel 2000 i due ordini di barre si fanno più frequenti, con la barra esterna che raggiunge 1,2 – 1,4 m di altezza, ubicata a maggior profondità (-3,5 -4 m).

Per quanto riguarda l'andamento dei fondali, si osserva una pendenza di circa 0,37° nel 1968 la quale nell'anno 2000 è aumentata leggermente in corrispondenza di Lido degli Estensi (fino a 0,46°) e del tratto Sud di Lido di Spina (fino a 0,66°).

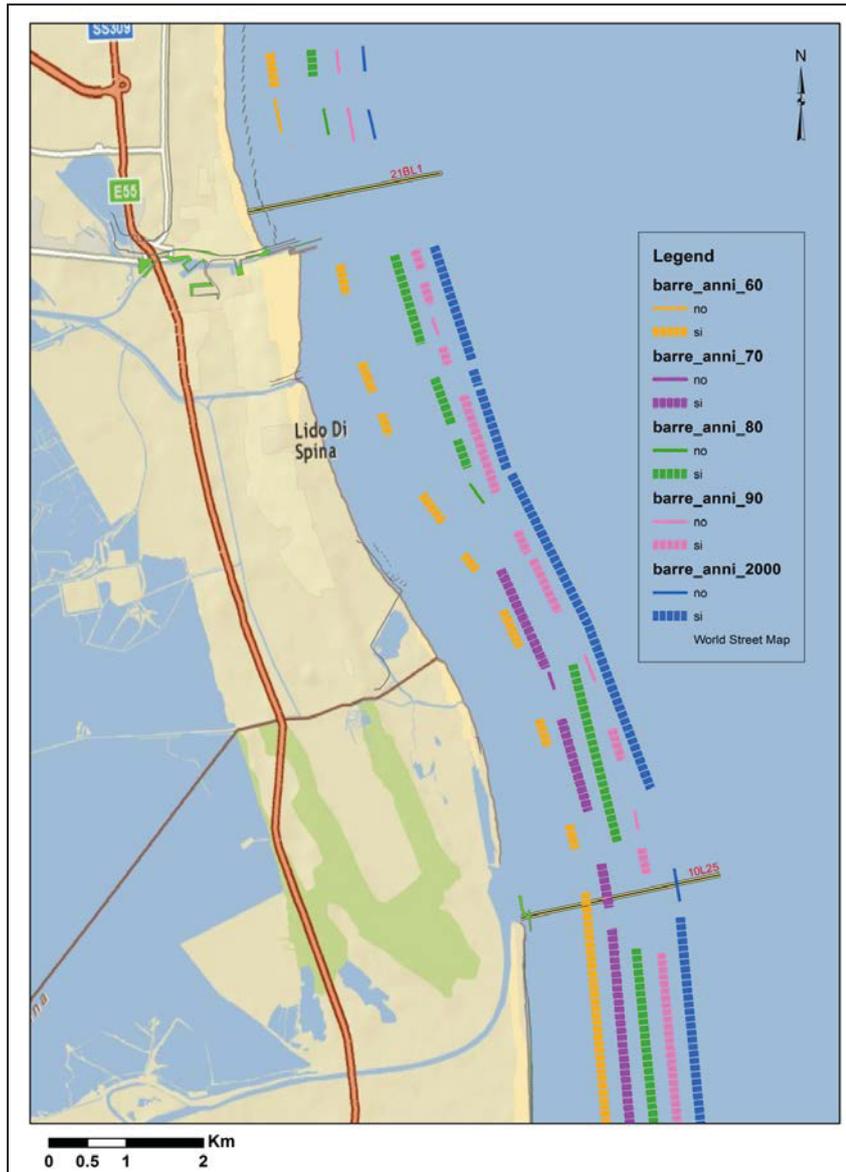


Fig. 4.13 - Cella 2 - Porto Garibaldi – Foce Reno.

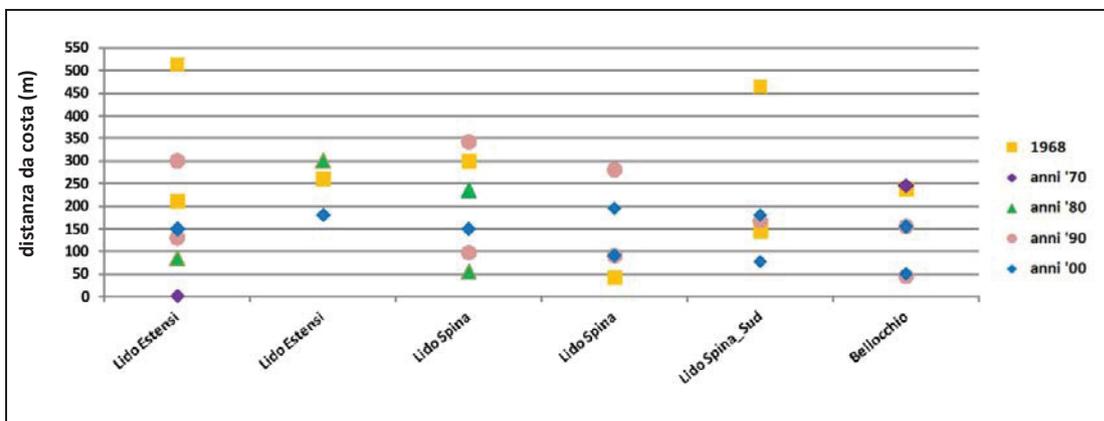


Fig. 4.14 - Cella 2 - Distribuzione delle barre dal '68 al 2000 ed eventuale presenza di opere di difesa.

Cella III - Foce Reno – Porto Corsini

Sin dal rilievo del '68, si registra la presenza costante di barre con altezze comprese tra 0,6 ed 1,2 m ubicate attorno alla profondità di -2 m. Negli anni '70 in alcune sezioni la barra è a minor profondità ma ne compare un secondo ordine vicino alla foce del Fiume Reno e presso Marina Romea. Nel primo caso, i due ordini di barre hanno altezze simili (0,8 e 1 m) alla profondità rispettivamente di -1,5 e 2,7 m; nel secondo caso, la barra più vicina a costa ha un'altezza ridotta (0,3-0,4 m) e si trova a 1,5 m di profondità, mentre la seconda, a profondità oltre i -3 m ha un'altezza media di 0,8 m.

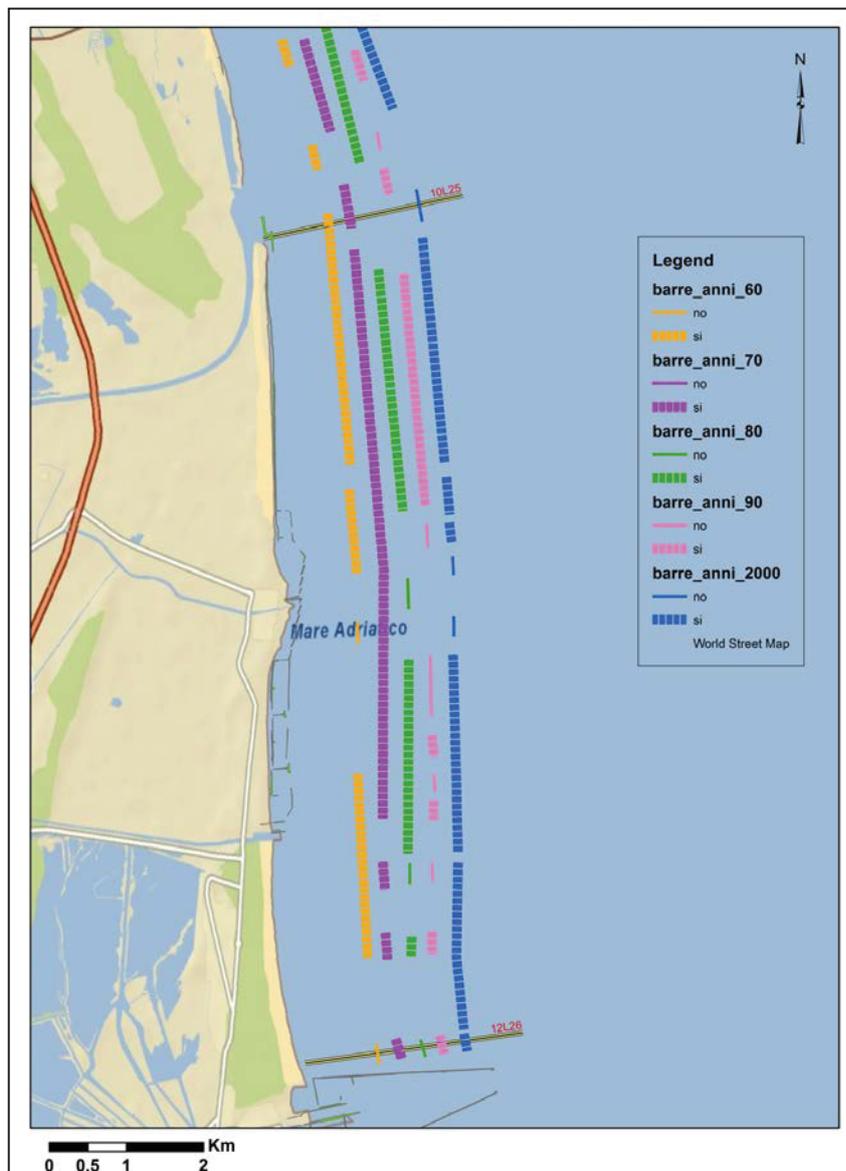


Fig. 4.15 - Cella 3 – Foce Reno – Porto Corsini.

Negli anni '80 ritorna un solo ordine di barre: in prossimità del Poligono di tiro Militare esse sono ben sviluppate, con altezze di 1,1 - 1,5 m alle profondità di 2,1 - 3,5 m, mentre più a Sud hanno dimensioni minori (0,4 - 0,6 m) .

Sebbene negli anni '90 sia stata costruita una barriera aderente presso il Poligono Militare di tiro, le barre permangono ma si attestano ad una profondità maggiore, circa -3/-3,5 m e con altezze oltre il metro.

L'ultimo rilievo, nel 2000, conferma la presenza di un ordine di barre presso il Poligono Militare e di due ordini a Casalborssetti e Marina Romea, con quella interna intorno a 0,4 m di altezza alla profondità di -1/-1,3 m e quella esterna di altezza oltre 1 m e profondità di circa -3 m.

In questa zona i fondali hanno mantenuto una pendenza costante nei 32 anni analizzati, di circa 0,5° tra la linea di riva e la batimetrica dei 6 m.

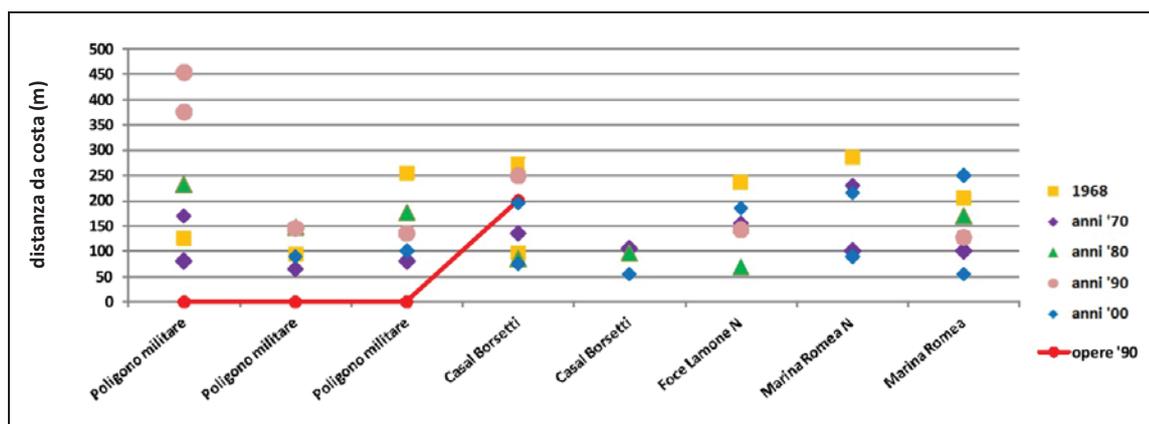


Fig. 4.16 - Cella 3 - Distribuzione delle barre rilevate dal '68 al 2000 ed eventuale presenza di opere di difesa rigide.

#### Cella IV - Marina di Ravenna - Foce Bevano

Si osserva un'altezza di tratti difesi con vari tipi di opere ed altri completamente privi, strettamente correlabili all'evoluzione delle cuspidi fluviali, in particolare Fiumi Uniti, entrata in forte erosione a partire dagli anni '50.

Dal molo Sud di Porto Corsini fino a Punta Marina (Fig. 4.17), si osserva a fine anni '60 la presenza, anche se non continua, di una barra di modeste dimensioni (0,4 m), entro i -1,7 m di profondità.

Negli anni '70 la loro presenza diventa più costante, con dimensioni e profondità maggiori (altezza media 0,8 m e profondità media -2,3 m), per diminuire negli anni '80 (altezza media 0,5 m; profondità media -1,4 m) fino a scomparire negli anni '90 su gran parte delle sezioni. Ciò può essere in parte dovuto alla messa in opera di barriere in sacchi alla profondità di circa -2,3 m, come struttura di contenimento del ripascimento eseguito sulla spiaggia emersa. Nel 2000, si osserva la presenza di una barra di modeste dimensioni (0,35 m di altezza) attorno a -1,4 m di profondità nel tratto di Punta Marina non protetto dalle barriere in sacchi o dove tali barriere in sacchi erano già distrutte.



Fig. 4.17 - Cella 4 - Porto Corsini - Foce Bevano.

Nel tratto presso Lido Adriano, non sono presenti barre nei vari rilievi analizzati, se non in una sola sezione nel '68. Si sottolinea che dagli anni '70 sono state realizzate barriere foranee posizionate attorno alla profondità di -2,2 m e costruito un muro di sponda più a Sud.

Per il tratto a Sud della foce di Fiumi Uniti (Fig. 4.17) non sono disponibili dati degli anni '70; si osserva comunque la presenza di un ordine di barre con altezza attorno a 0,5 m e profondità di -2 m negli anni '60, che aumentano di altezza (Hb 0,8 m) alla profondità media di -2,3 m nei decenni successivi, fino a quando vennero realizzate le barriere a protezione dell'abitato di Lido di Dante.

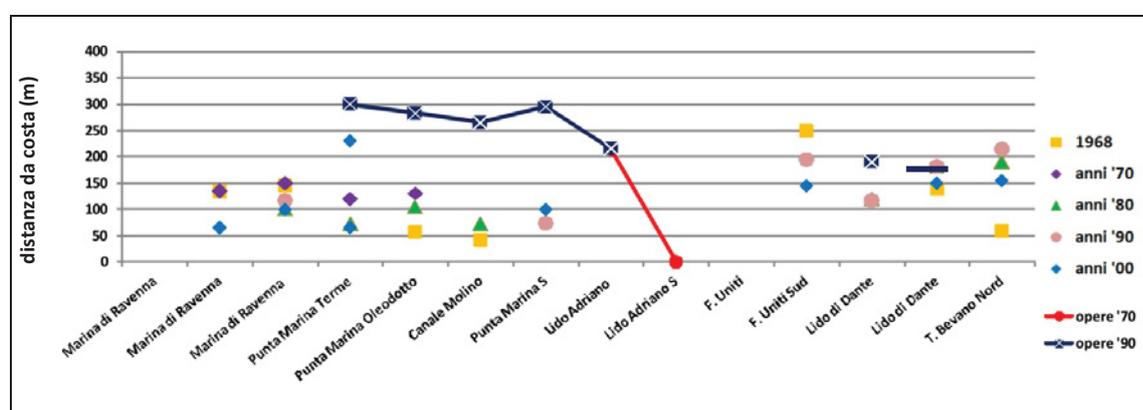


Fig. 4.18 - Cella 4 - Distribuzione delle barre rilevate dal '68 al 2000 ed eventuale presenza di opere di difesa rigide.

#### Cella V - Foce Bevano – Porto Canale di Cesenatico

Nel tratto a settentrione della foce del fiume Savio si evidenzia la presenza costante di un ordine di barre, con altezze di circa 0,5 m, alla profondità di -2,2 m fino agli anni '70, quando le opere foranee realizzate presso Lido di Classe vicino a costa hanno sostituito la barra. I dati degli anni '90 rilevano di nuovo la presenza della barra lungo tutto il tratto, con altezze medie di 0,6 m alla profondità di -2,2 m; in corrispondenza delle opere rigide la barra si attesta alla profondità di -2,8 m, oltre le barriere stesse, ma con dimensioni inferiori. Nel 2000 la barra è presente nel tratto a Nord di Lido di Classe, con altezze di circa 0,8 m e 0,5 m.

A meridione del fiume Savio, fino alla zona tra il porto di Cervia e Tagliata, il trasporto litoraneo è da Nord verso Sud, per poi invertirsi nuovamente fino al molo di Cesenatico. Il tratto difeso da barriere foranee negli anni '70 presso Lido di Savio non evidenzia la presenza di barre, mentre presso Milano Marittima si osserva la loro presenza fino all'inizio degli anni '80 con altezze medie di 0,4 - 0,6 m attorno ai -1,3 - -2 m di profondità. Dopo l'83, con la messa in opera di barriere in sacchi, la barra scompare per ricomparire soltanto nel rilievo del 2000 nel tratto più meridionale con un'altezza di 0,4 m alla profondità di 2,2 m.

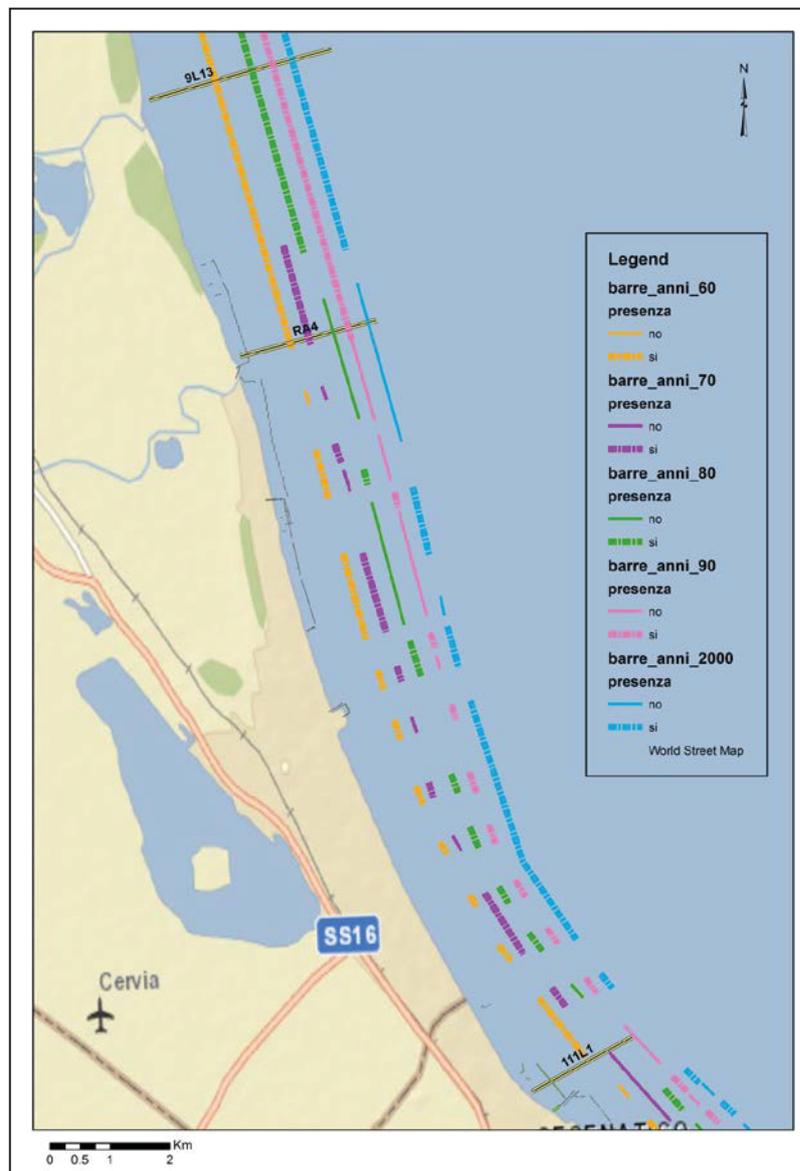


Fig. 4.19 - Cella 5 - Foce Bevano – Molo Nord Porto Canale Cesenatico.

A Sud del porto di Cervia le barre sono invece sempre presenti, ma qui non vi sono opere di difesa. Dal '68 agli anni '70 vi è un ordine di barre (0,7 m di altezza, alla -2 m circa) mentre negli anni '90 e nel 2000 compaiono due ordini di barre, alla profondità di 1,7 e 2,5 m. In corrispondenza di Pinarella di Cervia si osserva la presenza costante di due ordini di barre, con la barra interna di dimensioni ridotte (0,40 m) attorno a -1,4 m di profondità e con la barra esterna alta circa 0,6 m alla profondità di circa -2,1 m.

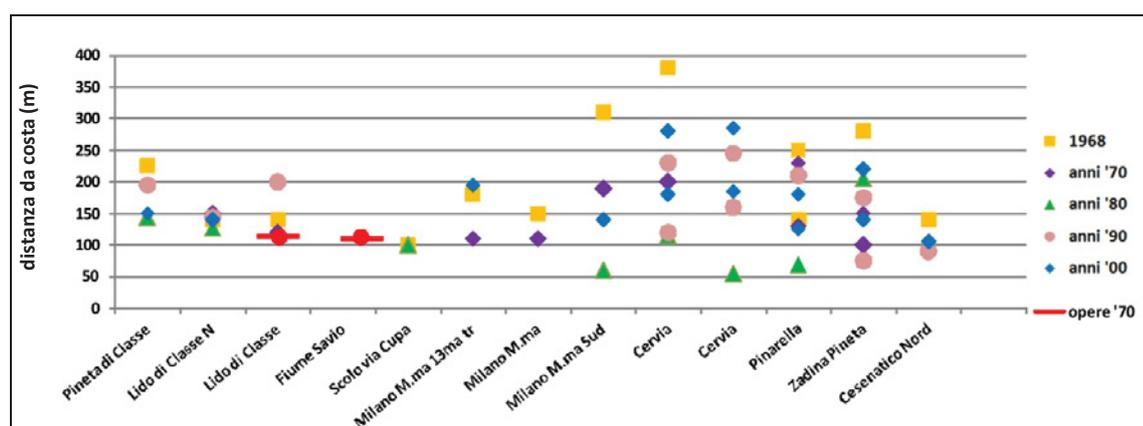


Fig. 4.20 - Cella 5 - Distribuzione delle barre rilevate dal '68 al 2000 ed eventuale presenza di opere di difesa rigide.

### Cella VI - Cesenatico – Rimini Nord

Tale tratto è fortemente differente da quelli precedentemente analizzati, in quanto soltanto nel tratto più a Nord, in corrispondenza dell'abitato di Cesenatico, sono presenti barre, sebbene di modesta entità nei rilievi analizzati.

Benché nel rilievo degli anni '90 in questo breve tratto si osservi la costruzione di barriere foranee piuttosto distanti da costa (circa 300 m), si osserva comunque la presenza di barre nei fondali protetti, attorno a -1,7 m di profondità in media e con altezze non oltre 0,6 m.

Il tratto a Sud dell'abitato è invece completamente privo di barre dal '68 al 2000. In questo tratto, da Gatteo a Mare fino al molo Nord di Rimini si rileva la presenza costante di barriere foranee posizionate ad breve distanza da costa in media intorno ai 100 m messe in opera prima del rilievo del '68.

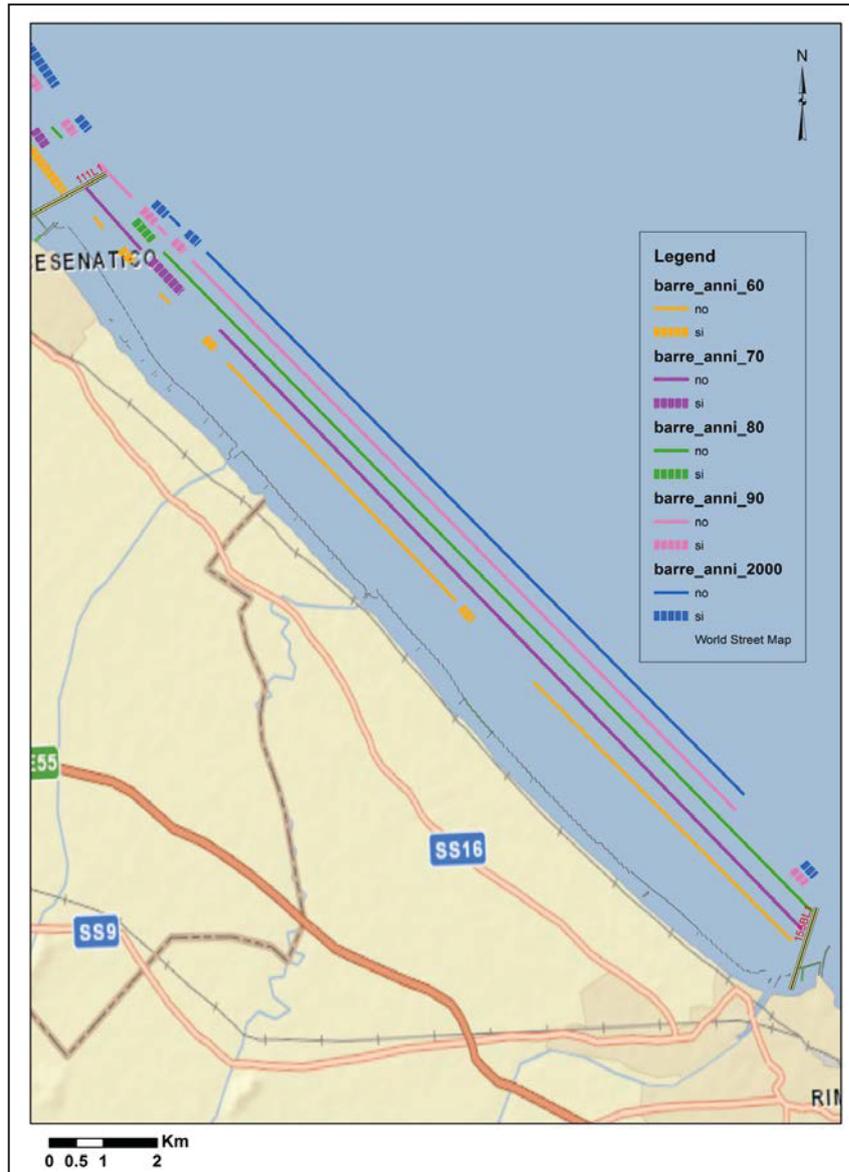


Fig. 4.21 – Cella 6 - Molo Sud Porto Canale Cesenatico – Molo di Rimini.

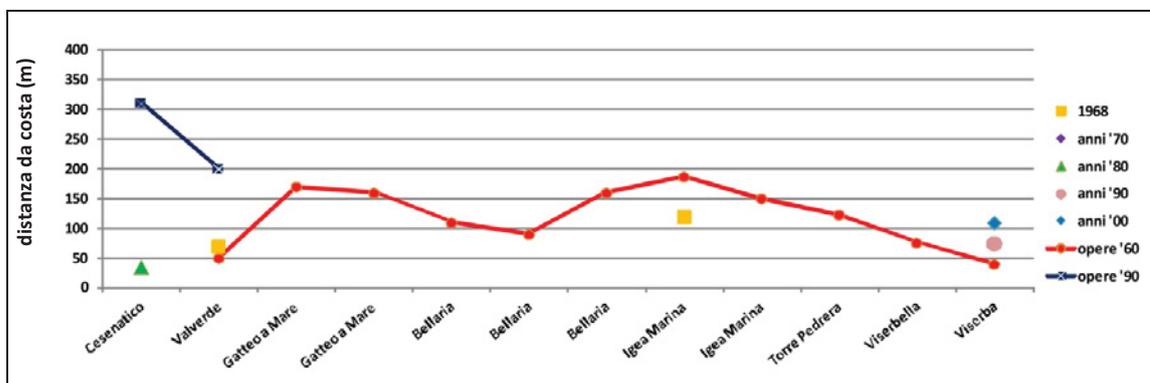


Fig. 4.22 - Cella 6 - Distribuzione delle barre rilevate dal '68 al 2000 ed eventuale presenza di opere di difesa rigide.

Cella VII - Rimini Sud – Cattolica

Si osserva la presenza di barre in modo pressoché continuo lungo tutto il tratto. Osservando il rilievo del '68 si denota un ordine di barre presso il litorale di Rimini, aventi altezze di circa 0,8 m ubicate attorno alla batimetrica dei 3 m, e due ordini di barre da Miramare fino a Misano, con la barra interna mediamente alta 0,6-0,8 m alla profondità dei 2 m circa e la barra esterna che varia molto le sue dimensioni da 0,4 m fino a 1 m, oltre la profondità di 3,5 m.

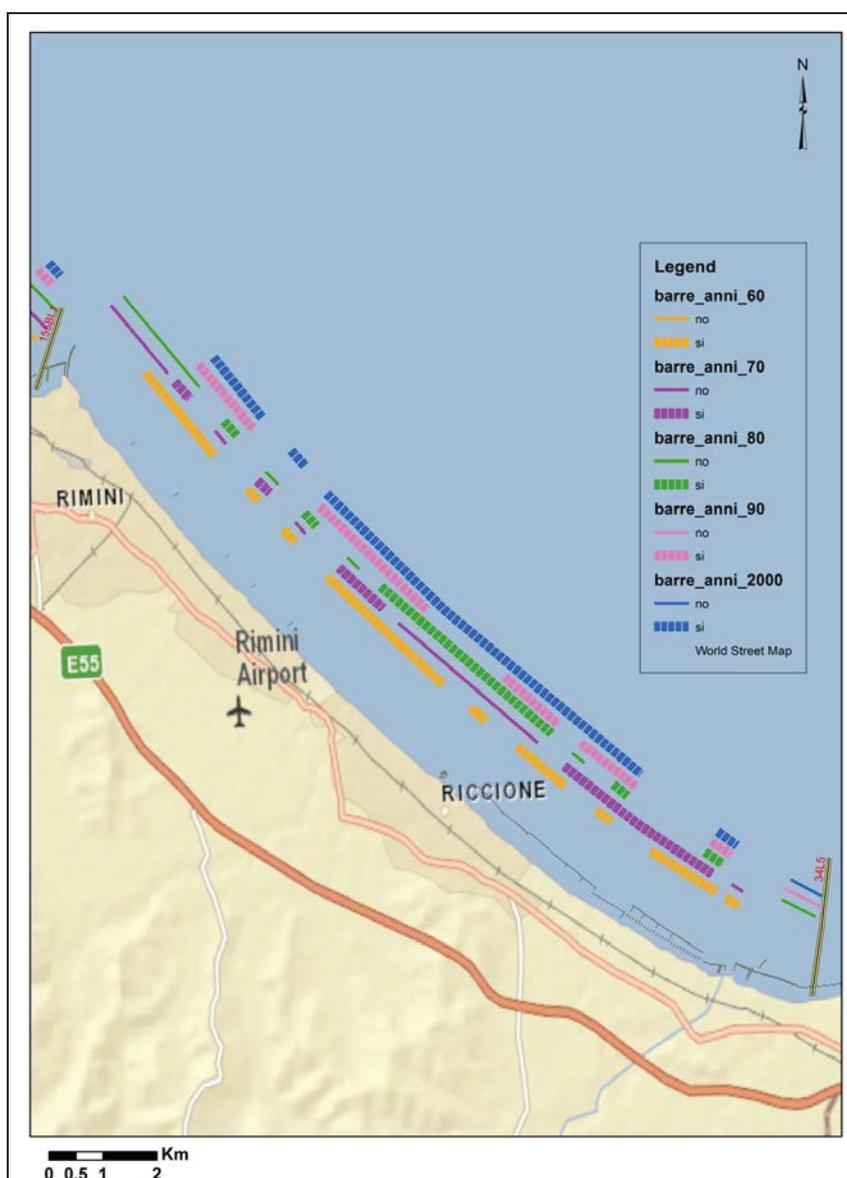


Fig. 4.23 – Cella 7 - Molo di Rimini – Misano.

Negli anni '70 le barre scompaiono sia a Rimini Sud che a Riccione, mentre lungo le altre sezioni si osserva un solo ordine di barre, con altezze tra 0,30 e 0,60 m alla profondità di circa -1,7 m e alla profondità media di 3 m negli anni '80.

Il rilievo degli anni '90 mostra un aumento delle dimensioni della barra, con altezze medie di 0,75 m, alla profondità di circa -2,8 m. Nel 2000 mentre a Rimini Sud la barra ha una dimensione ridotto (circa 0,4 m di altezza) a Miramare e Riccione Nord supera 0,8 m (-2,5 m di profondità).

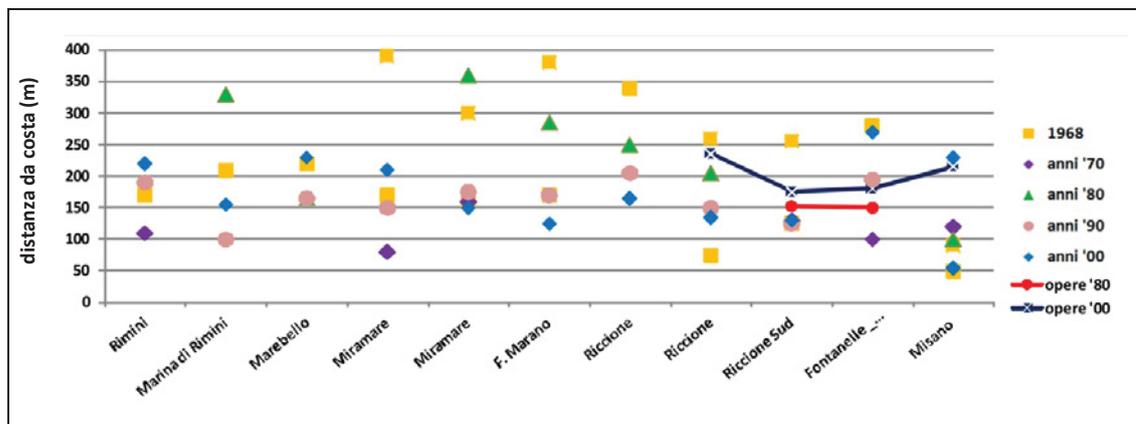


Fig. 4.24 - Cella 7 - Distribuzione delle barre rilevate dal '68 al 2000 ed eventuale presenza di opere di difesa rigide.

#### 4.3.1.1 Analisi dei parametri morfometrici delle barre

Nei 32 anni analizzati il numero di sezioni in cui sono state osservate le barre sono progressivamente diminuite fino agli anni '80 per poi aumentare nuovamente fino al 2000, senza però raggiungere il numero rilevato nel rilievo del 1968 (Tab. 4.3).

Si osserva un maggior numero di sezioni con un solo ordine di barre dagli anni '70 agli anni '90, mentre nel 1968 e nel 2000 il numero delle sezioni con due ordini di barre è molto maggiore. Si vuole ricordare in ogni caso che il computo del numero delle barre e dunque i loro parametri morfometrici sono fortemente influenzati dalla differente metodologia di rilievo adottata nei vari rilievi analizzati come ad esempio le tecniche utilizzate precedentemente agli anni '90.

Il campo di profondità in cui si formano le barre varia tra -1,5 e -3 m (il 73% delle barre osservate nella totalità dei dati a disposizione), con un approfondimento fino ai -4 m se sono presenti almeno due ordini di barre (Fig. 4.25).

	Profili con 1 barra	Profili con 2 barre	Tutti i profili con barre	Tutti i profili senza barre
anni '60	26	8	34	14
anni '70	24	4	28	20
anni '80	25	0	25	22
anni '90	21	5	26	22
anni 2000	21	10	31	17

Tab. 4.3 - Sezioni in cui è stata registrata la presenza o l'assenza di barre, tralasciando quelle sezioni in cui non si aveva a disposizione l'intero set di dati di tutti gli anni considerati.

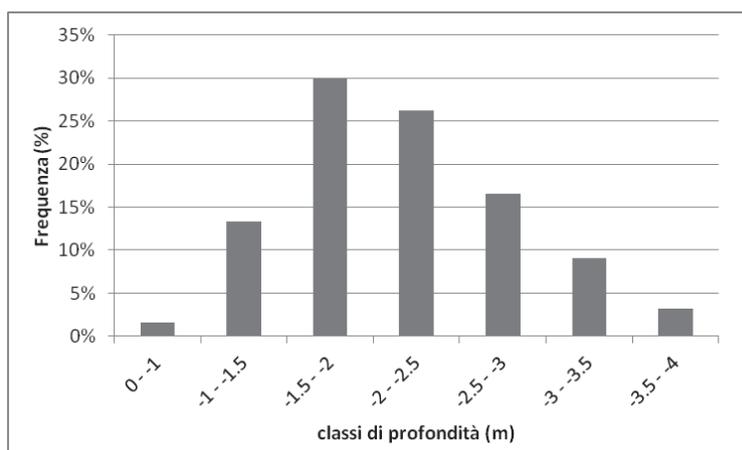


Fig. 4.25 - Frequenza della profondità in cui sono presenti le barre.

I profili che presentano una sola barra sommersa (Tab. 4.4, Fig. 4.26, Fig. 4.27), evidenziano un'altezza media della barra di 0,6 m, la cui base è ubicata alla profondità di circa -2,2 m.

In particolare si può osservare che negli anni '60 le barre in media erano disposte più al largo (circa 180 m dalla linea di riva), mentre negli anni '70 si registrano barre a minori profondità e più vicine a costa (130 m); la loro base risulta più stretta e dunque la loro sezione più piccola.

Negli anni '90 si registrano invece barre mediamente meglio sviluppate, alte in media 0,77 m, con la base a profondità maggiori (-2,6 m) e la sezione è la maggiore di quella relativa a tutti i rilievi analizzati. Nel 2000 le barre si riducono in dimensioni (altezza di 0,67 m) e la loro cresta si attesta attorno alla profondità di -1,65 m.

	anni '60	anni '70	anni '80	anni '90	anni 2000
<b>Hb</b>	0,60	0,64	0,58	0,77	0,67
<b>Pc</b>	-1,65	-1,36	-1,62	-1,86	-1,65
<b>Pb</b>	-2,25	-1,99	-2,20	-2,62	-2,32
<b>Lb</b>	75	62	66	79	77
<b>Dc</b>	180	129	156	160	147
<b>A</b>	22	20	19	30	26

Tab. 4.4 - Valori medi dei parametri morfometrici sulle sezioni analizzate. Hb = altezza della barra, Lb = larghezza della base, Pc = profondità della cresta rispetto al l.m.m misurato a quel tempo, Pb = profondità della base, Dc = distanza della cresta della barra dalla linea di riva, A = area in sezione.

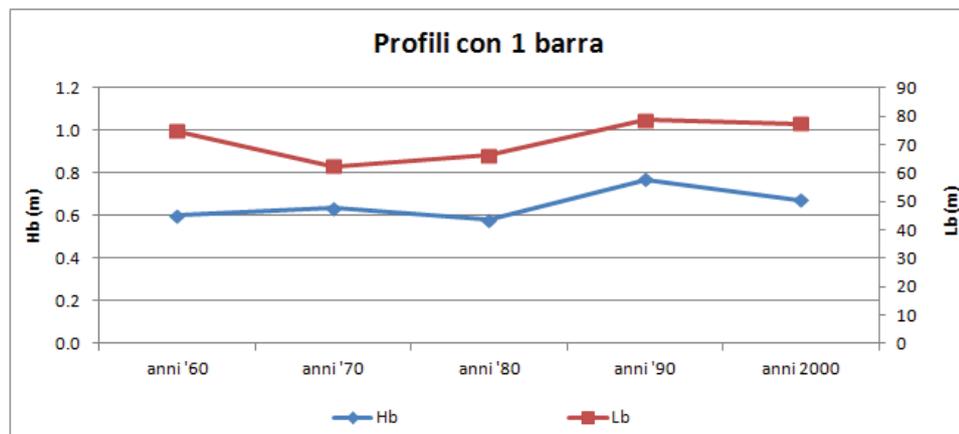


Fig. 4.26 - Evoluzione dei parametri morfometrici di altezza della barra Hb e di larghezza della base Lb, nel periodo 1968 - 2000 per le sezioni con un solo ordine di barre.

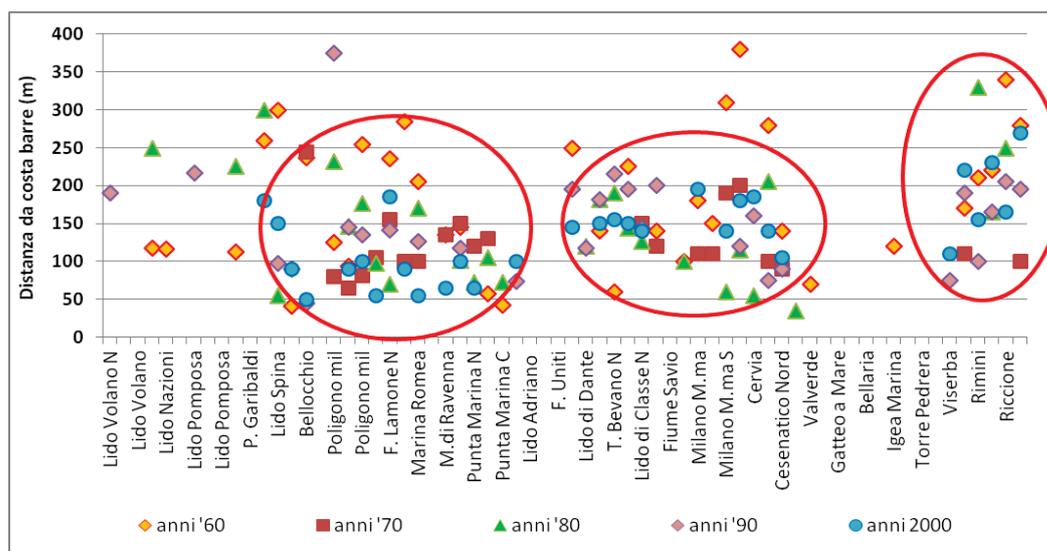


Fig. 4.27 - Distribuzione delle barre (solo un ordine) e loro distanza da costa.

Nei profili in cui sono stati osservati due ordini di barre (Tab. 4.5, Fig. 4.28) si registra la barra interna con altezze e larghezza della base inferiori rispetto alla barra esterna. L'altezza media per la barra interna è intorno a 0,5 m e oltre 0,70 m per quella esterna; molto di più varia la larghezza della base. Un'altra differenza importante riscontrata è la dimensione areale occupata dalla barra in sezione: l'area della barra esterna è sempre il doppio o il triplo di quella interna.

	anni '60		anni '70		anni '80		anni '90		anni 2000	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
<b>Hb</b>	0,58	0,69	0,49	0,75	0,40	0,75	0,54	0,79	0,48	0,80
<b>Pc</b>	-1,53	-2,78	-0,96	-1,75	-0,90	-1,90	-1,33	-2,24	-1,24	-2,21
<b>Pb</b>	-2,11	-3,47	-1,45	-2,50	-1,30	-2,65	-1,88	-3,03	-1,72	-3,01
<b>Lb</b>	63	104	38	99	40	75	55	121	43	110
<b>Dc</b>	134	317	103	195	55	235	137	273	99	218
<b>A</b>	18	36	9	37	8	28	15	48	10	44

Tab. 4.5 - Valori medi dei parametri morfometrici misurati sulle sezioni analizzate. Hb = altezza della barra, Lb = larghezza della base, Pc = profondità della cresta rispetto al l.m.m a quel tempo, Pb = profondità della base, Dc = distanza della cresta della barra dalla linea di riva, A = area in sezione.

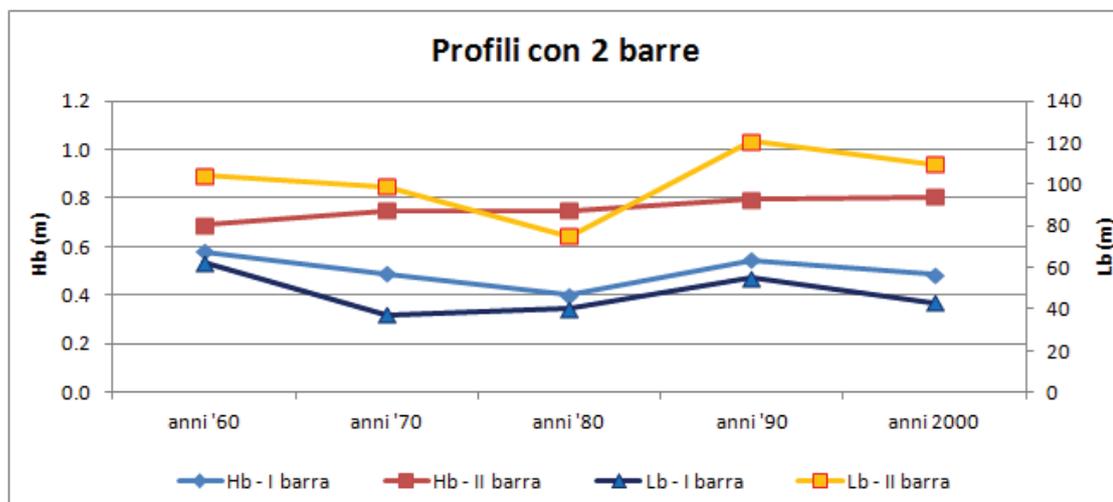


Fig. 4.28 - Grafico rappresentante l'evoluzione dei parametri morfometrici di altezza della barra Hb (ordinata a sinistra) e di larghezza della base Lb (ordinata a destra), nel periodo 1968 - 2000 per le sezioni in cui sono stati osservati due ordini di barre.

Analizzando l'evoluzione nel tempo dei parametri morfometrici delle barre, si osserva che negli anni '60 la barra interna era alta in media 0,6 m, con la cresta a circa -1,5 m dal livello medio marino e distante da costa in media 134 m. La barra esterna, invece, benché di altezza poco maggiore (0,7 m) aveva una sommergenza della cresta di circa -2,8 m e distava da costa oltre 300 m. Negli anni '70 la barra esterna varia di molto, avvicinandosi a costa di circa 120 m e attestandosi a profondità inferiori rispetto al decennio precedente. Con la barra esterna varia anche quella interna, anch'essa a profondità inferiori, con la cresta a -1 m dal livello medio del mare. Negli anni '80 le barre sono molto più vicine a costa (55 m) e la profondità della cresta ancora inferiore (-0,9 m). Negli anni '90 le barre sono più distanti da costa e la loro cresta a profondità maggiori (-1,3 e -2,2 m). I rilievi di questo periodo evidenziano le maggiori dimensioni per la barra esterna, con la base ampia in media 120 m alla profondità di circa -3 m.

I parametri morfometrici osservati nei rilievi del 2000 evidenziano una barra interna alta circa 0,5 m con la cresta a -1,2 m e una barra esterna ben sviluppata, alta in media 0,8 m alla profondità di circa -2,2 m.

Dall'analisi dei profili con più barre risulta che la barra esterna presenta i valori più alti di altezza (Hb), larghezza della base (Lb) così come il rapporto Lb/Hb, rispetto a

quella interna (Tab. 4.6). Ciò dimostra come all'aumentare dell'altezza aumenti in proporzione ed in maniera maggiore la larghezza. Infatti le barre esterne hanno una forma più piatta, mentre quelle più vicine a costa sono più strette ed appuntite. Tale differenza potrebbe essere relazionata sia alla diversa granulometria che le compone sia ai diversi effetti prodotti dal moto ondoso al variare della profondità del fondale (King & Williams, 1949; Short, 1975; Bondesan e Simeoni, 1983).

I sedimenti più grossolani, a parità di moto ondoso, in virtù del loro più alto angolo di riposo, dovrebbero generare barre più ripide. Inoltre la minor turbolenza verso il largo che permette la sedimentazione di materiale più sottile e la diminuzione della velocità della corrente di ritorno determinerebbero barre con la base più larga.

Analizzando il rapporto tra la profondità della cresta e quella della base della barra ( $P_c/P_b$ ), valori strettamente legati all'altezza della barra stessa, si osserva che tale valore aumenta con la profondità come già osservato da Keulegan (1948).

Per quanto riguarda il numero delle barre e la pendenza media dei fondali, nel tratto compreso tra la linea di riva e i -6 m di profondità, non si osserva una correlazione in quanto i valori medi sono del tutto simili. Si può affermare, tuttavia, che i profili in cui non è presente la barra hanno valori medi leggermente inferiori ( $0,36^\circ$ ) ai profili con uno o due ordini di barre ( $0,39^\circ$  e  $0,41^\circ$ ) (Tab. 4.6).

Osservando nel dettaglio il range di variabilità della pendenza con il numero delle barre, la pendenza dei profili senza barre varia da  $0,07^\circ$  a  $0,64^\circ$ , quella dei profili con una barra da  $0,24^\circ$  a  $1,01^\circ$  e quella con due barre da  $0,41^\circ$  a  $0,89^\circ$ .

Osservando la distribuzione di due ordini di barre sui fondali emiliano-romagnoli, emerge che la loro presenza si ripete nel tempo nel tratto compreso tra Lido degli Estensi e Marina Romea e nel tratto tra Cervia e Pinarella di Cervia. I fondali antistanti Riccione e Misano Adriatico, invece, mostra un secondo ordine di barre solo negli anni '60 (Fig. 4.29).

Ponendo l'attenzione sulla distanza tra le creste dei due ordini di barre, nella zona tra Lido degli Estensi e Marina Romea, essa sembra essere più ampia (fino a 300 m) negli anni '60, per ridursi poi negli anni '70 ed '80 (tra 90 e 170 m). Negli anni '90 la distanza tra di esse varia molto (tra i 70 e i 250 m), ma nel 2000 è compreso tra 100 e 200 m.

Nella zona di Cervia, la distanza tra le creste dei due ordini di barre rimane compresa tra i 50 ed i 120 m per tutto l'intervallo di tempo considerato. Infine nella zona più a Sud, tra Riccione e Misano, i due ordini di barre sono distanti in media 130 - 230 m, fatta eccezione per una sola sezione in cui esse distano meno di 50 m.

	Profili con 1 barra		Profili con 2 barre	
	I	II	I	II
Hb	0,65		0,52	0,76
Lb	71		51	108
Lb/Hb	122,3		105,3	169,2
Pc/Pb	0,71		0,7	0,75
$\beta$	0,39		0,41	

Tab. 4.6 - Valori medi di alcuni parametri morfologici per quanto riguarda le barre rilevate nell'intero periodo analizzato.

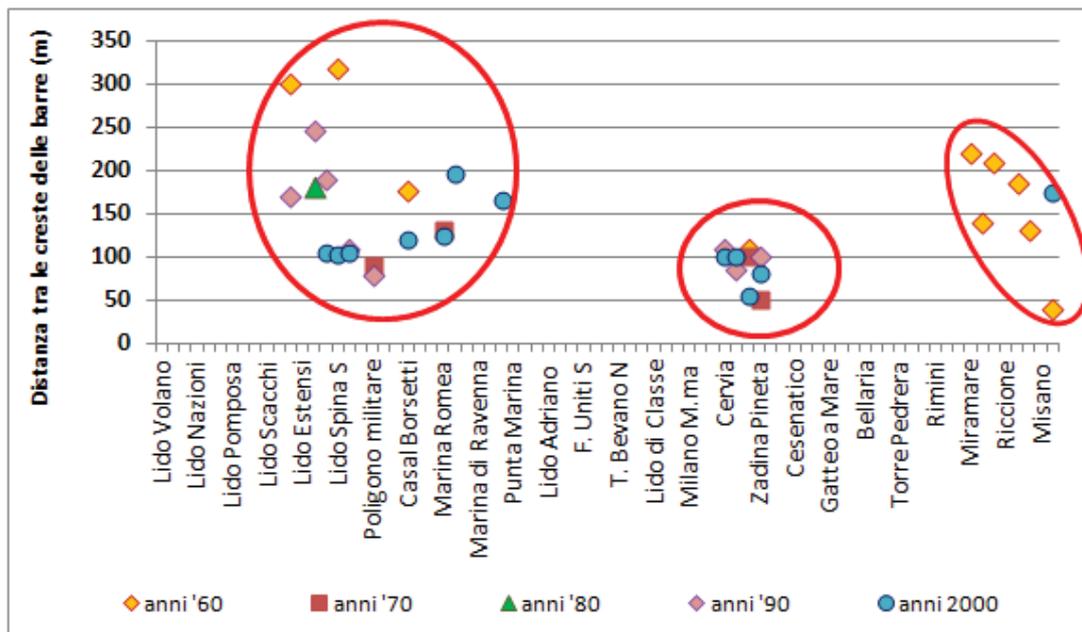


Fig. 4.29 - Distribuzione della presenza di due ordini di barre sui fondali emiliano-romagnoli. Nel grafico è rappresentata la distanza delle creste della barra interna ed esterna.

### 4.3.2 Analisi della variazione della profondità dei fondali

Lo studio dell'evoluzione dei fondali non poteva trascurare le variazioni delle profondità, determinanti nell'analisi dell'evoluzione morfodinamica della fascia costiera.

Dall'analisi delle distanze da costa delle batimetriche dei 5 m e degli 8 m per gli anni '68 e 2000 (Tab. 4.7, Fig. 4.30), è stato osservato che entrambe le batimetriche hanno evidenziato da Nord a Sud un avvicinamento a costa, meno evidente per i -5 m ma molto più pronunciato per i -8 m.

Il tratto a ferrarese, ad eccezione di Lido delle Nazioni, dove la batimetrica degli 8 m mostra uno spostamento verso il largo, registra un avvicinamento a costa medio di 450 m; la batimetrica dei 5 m invece di soli 150 m.

sezioni	distanza da 0 (m) CNR 1968		distanza da 0 (m) ARPA 2000		variazione distanza (m)		variazione pendenza (°)	
	-5	-8	-5	-8	-5	-8	-5	-8
Lido delle Nazioni	700	2600	650	3200	-50	600	0,03	-0,03
Porto Garibaldi	900	2200	750	1800	-150	-400	0,06	0,05
Foce Reno	500	1600	350	1100	-150	-500	0,25	0,13
Foce Lamone	750	1700	600	1400	-150	-300	0,1	0,06
Marina di Ravenna	900	2200	700	2400	-200	200	0,09	-0,02
Foce Fiumi Uniti	1000	1800	500	1200	-500	-600	0,29	0,13
Foce Bevano	1050	3100	750	1700	-300	-1400	0,11	0,12
Milano Marittima	1000	3300	950	2200	-50	-1100	0,02	0,07
Cesenatico N	1100	3200	1100	2500	0	-700	0	0,04
Cesenatico S	770	2100	770	1550	0	-550	0	0,08
Igea Marina	750	1400	600	1350	-150	-50	0,1	0,01
Rimini S	770	1300	600	1200	-170	-100	0,11	0,03
Riccione N	700	1200	700	1200	0	0	0	0
Misano	700	1200	600	1100	-100	-100	0,07	0,03
Cattolica	600	1300	600	1100	0	-200	0	0,06

Tab. 4.7 – Variazione della distanza dalla linea di riva in metri delle batimetriche dei 5 m e degli 8 m dal 1968 al 2000 (da ARPA, 2000 modificato).

Altra eccezione al trend generale è il fondale di Marina di Ravenna, dove si registra un trend positivo per la batimetrica dei 5 m (+200 m) ed un trend negativo per quella

degli 8 m (-200 m). Dalla foce dei Fiumi Uniti sino a Cesenatico, invece, il trend è fortemente negativo, con avvicinamenti della batimetrica degli 8 m fino a 1400 m verso costa. Infine, il tratto meridionale da Igea Marina fino a Cattolica mostra la batimetrica dei 5 m mediamente stabile o con arretramenti medi di 100 m e la batimetrica degli 8 m che si avvicina a costa in maniera progressiva fino a raggiungere i 200 m a Cattolica.

Dal presente studio si può constatare che il massimo abbassamento dei fondali è stato registrato presso le foci fluviali del Reno, dei Fiumi Uniti e del Bevano, fenomeno correlabile con lo smantellamento delle cuspidi fluviali in atto dagli anni '30.

Anche la naturale subsidenza di tale aree, sommata a quella indotta dalla coltivazione dei giacimenti di metano e dall'estrazione di acqua, però, ha contribuito ad accentuare tale trend, in particolare quello di Angela-Angelina in corrispondenza di Fiumi Uniti, iniziata nel 1974.

Dall'analisi della variazione della pendenza media dei fondali compresi tra la linea di riva e la batimetrica dei 5 m (Tab. 4.8), si può osservare come in media tale valore sia aumentato in 32 anni da 0,37° a 0,45°, accentuandosi in corrispondenza delle foci fluviali.

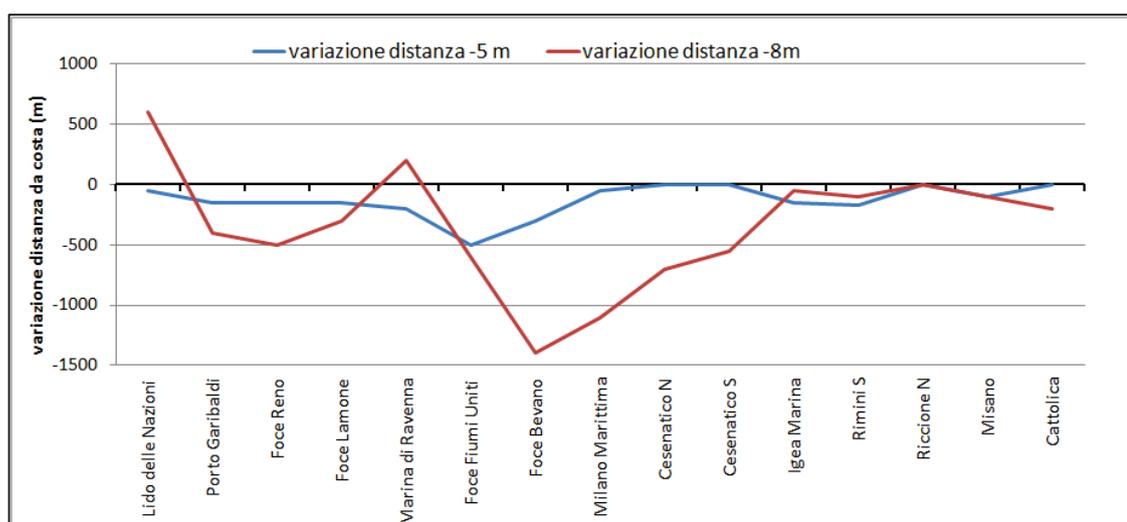


Fig. 4.30 - Grafico della variazione della distanza delle batimetriche dei 5 e degli 8 m dalla linea dal 1968 al 2000.

Ad esempio, presso la foce del fiume Reno si registra una pendenza già elevata nel '68 (0,57°) e che aumenta fino a 0,82° nel 2000; altri esempi sono i fondali presso la foce del Lamone passano da 0,38° a 0,48° o i fondali presso la foce dei Fiumi Uniti, dove la pendenza passa da 0,29 nel '68 a 0,57° nel 2000.

Tale trend non è invece riscontrato presso Milano Marittima, Cesenatico, Riccione e Cattolica, dove sono stati registrati gli stessi valori di pendenza per il periodo esaminato.

	Pendenza (°)	
	1968	2000
<b>Lido delle Nazioni</b>	0,41	0,44
<b>Porto Garibaldi</b>	0,32	0,38
<b>Foce Reno</b>	0,57	0,82
<b>Foce Lamone</b>	0,38	0,48
<b>Marina di Ravenna</b>	0,32	0,41
<b>Foce Fiumi Uniti</b>	0,29	0,57
<b>Foce Bevano</b>	0,27	0,38
<b>Milano Marittima</b>	0,29	0,30
<b>Cesenatico N</b>	0,26	0,26
<b>Cesenatico S</b>	0,37	0,37
<b>Igea Marina</b>	0,38	0,48
<b>Rimini S</b>	0,37	0,48
<b>Riccione N</b>	0,41	0,41
<b>Misano</b>	0,41	0,48
<b>Cattolica</b>	0,48	0,48

Tab. 4.8 - Pendenza dei fondali compresi tra la linea di riva e la batimetrica dei 5 m per gli anni 1968 e 2000 (da ARPA, 2000 modificato)..

L'aumento della profondità dei fondali era stato già riscontrato da Bondesan et al. (1978), i quali, confrontarono i rilievi eseguiti sui fondali ferraresi e ravennati con i dati del rilievo del CNR del 1968 e con le carte nautiche dell'I.I.M.). Dal loro studio emerse il trend erosivo osservato sulla spiaggia emersa a partire dal 1935 trovasse riscontro anche nelle modifiche subite dai fondali.

Gli autori infatti sottolinearono un progressivo smantellamento degli apparati deltizi dei fiumi e una spiccata azione rettilineante del mare. L'aumento della pendenza dei fondali ha come causa principale il trend erosivo, da attribuirsi ad una diminuzione

dell'apporto solido da parte dei corsi d'acqua, testimoniato dal fatto che sono proprio gli apparati di foce dei fiumi, non più sufficientemente riforniti, ad essere stati erosi per primi e con maggiore intensità Bondesan et al. (1978).

Anche lo studio di Perini e Calabrese (2010) ha evidenziato tale evoluzione dei fondali per l'intero tratto regionale nel periodo 1953-2006. Secondo tali autori, nel settore dei lidi ferraresi, i forti abbassamenti riscontrati (anche oltre 1 m) sono imputabili alla costruzione delle opere di difesa longitudinali; nell'area di foce del fiume Reno le differenze di oltre 2-3 m sono legate al forte arretramento della linea di riva e alla migrazione di tutto il profilo di spiaggia sommersa verso terra e all'approfondimento della spiaggia esterna molto evidente. Anche il tratto di foce del Lamone, sebbene con variazioni molto minori, presenta la stessa situazione.

La zona più critica è stata riscontrata presso Fiumi Uniti e Lido Adriano, con abbassamenti maggiori oltre i -3 m di profondità. Infine nei tratti più meridionali gli approfondimenti maggiori si osservano in corrispondenza delle zone in cui sono state costruite opere di difesa.

#### 4.4 Considerazioni

---

Lo studio del litorale emiliano-romagnolo dagli anni '60 al 2000 ha dunque evidenziato la presenza delle barre fin dai primi rilievi. La loro distribuzione ed i loro parametri morfometrici sono però differenti nel corso dei 40 anni esaminati. È stata rilevata la presenza sia di un ordine che di due ordini di barre; il campo di profondità in cui esse si formano varia tra -1,5 e -3 m (73%), con un approfondimento fino ai -4 m se sono presenti due ordini di barre.

Quando è presente un solo ordine di barre, l'altezza media varia tra 0,6 e 0,8 m, mentre la larghezza della base è compresa in media tra i 60 e gli 80 m. Generalmente esse sono distanti da costa 130 - 180 m e la loro cresta non supera i 2 m di profondità.

Quando sono presenti due ordini di barre, la barra interna è più piccola rispetto alla barra esterna. L'altezza media della barra interna è intorno a 0,5 m ed oltre 0,7 m in quella esterna; molto di più varia la larghezza della base (40-60 m quella interna e 100-

120 m quella esterna); le barre esterne hanno infatti una forma più piatta e larga in sezione, mentre quelle più vicine a costa sono più ripide e asimmetriche.

Per quanto riguarda la distribuzione delle barre lungo il litorale regionale, si osservano zone in cui le barre non sono mai state rilevate, altre zone in cui erano presenti e poi sono scomparse ed altre in cui sono state invece sempre presenti.

Dall'analisi della distribuzione di due ordini di barre sui fondali emiliano-romagnoli, è stato osservato che la loro presenza si ripete nel tempo nel tratto compreso tra Lido degli Estensi e Marina Romea e nel tratto tra Cervia e Pinarella di Cervia. I fondali antistanti Riccione e Misano Adriatico, invece, mostra un secondo ordine di barre solo negli anni '60. Non si osserva una correlazione tra il numero di ordini delle barre e la pendenza media dei fondali, in quanto i valori medi sono del tutto simili. Si può affermare, tuttavia, che, dove le barre non sono presenti, i profili hanno valori medi leggermente inferiori rispetto ai profili con uno o due ordini di barre.

L'evoluzione delle barre è stata messa in relazione all'evoluzione della linea di riva, alla presenza od assenza di opere di difesa.

In realtà nell'analisi è importante considerare la tipologia e l'anno di realizzazione di opere di difesa sia di tipo rigido, quali barriere foranee o aderenti, pennelli e barriere in sacchi, sia di tipo morbido, come ripascimenti della spiaggia. In questo ultimo caso è importante conoscere la provenienza del materiale (da cave o sbancamenti a terra, o da accumuli litoranei), in quanto l'apporto di materiale dall'esterno contribuisce chiaramente al bilancio sedimentario della zona di intervento, mentre il materiale che viene prelevato da litorali in accumulo comporta un ammanco su questi siti di prelievo ed un guadagno nella zona di versamento. Le informazioni necessarie sono risultate però frammentarie e non descrivono con sufficiente accuratezza le caratteristiche dei siti di prelievo (quando proveniente da litorali in accumulo) o la zona esatta di versamento.

Per quanto riguarda le opere rigide, per conoscere il periodo di messa in opera, sono state di grande aiuto le ortofoto (già utilizzate per la digitalizzazione delle linee di riva) dal '43 al 2000. Si è dunque tentato di correlare le informazioni ottenute dalla fotointerpretazione con i dati di ARPA - Regione Emilia Romagna (2007, 2009).

Per quanto riguarda le opere sommerse o semi-sommerse (barriere in massi o in sacchi) tale analisi è stata più ostica, in quanto essendo fortemente legata alla trasparenza dell'acqua durante le riprese aeree, non è stato sempre possibile osservare la presenza di strutture. Per quanto riguarda i ripascimenti, sono state raccolte alcune informazioni dal lavoro della Regione Emilia-Romagna (2009).

Di seguito si riporta una sintesi ed alcune considerazioni sulle celle analizzate.

Nella cella I, dallo studio effettuato è stato osservato che l'assenza di barre da Porto Garibaldi a Lido delle Nazioni (FE) è strettamente correlato alla presenza di barriere foranee costruite dal '66 alla distanza di circa 200 m da costa, alla profondità di circa -2,3 m, costruite per tamponare il fenomeno erosivo già evidente dagli anni '40. Questa correlazione potrebbe essere confermata dalla presenza di barre presso Lido delle Nazioni, quando la costruzione delle barriere si fermava più a Sud, a Lido di Pomposa (FE). Quando la costruzione proseguì verso Nord, le barre scomparvero anche sui fondali di Lido delle Nazioni. Bisogna però sottolineare che, non conoscendo la situazione dei fondali prima della realizzazione delle barriere, non si ha la certezza che esse scomparvero a causa delle barriere, benché esse siano state posizionate proprio nella zona in cui generalmente si formano le barre sommerse.

A Lido di Volano (FE), dove non sono presenti opere di difesa e la linea di riva mostrava trend di avanzamento fino agli anni '70, le barre non sono mai state presenti; pertanto tale situazione potrebbe essere legata ad altri fattori, come ad esempio la più bassa pendenza dell'intero litorale ( $<0,2^\circ$ ) e la convergenza di due flussi (da NE e da S).

Per quanto riguarda i ripascimenti, dal 1983 al 2000 sono stati versati in questa cella circa 41.000 m<sup>3</sup> di materiale proveniente da accumuli litoranei. Nonostante tale contributo sedimentario, non è stata rilevata la comparsa di barre sommerse.

Nella Cella II non sono presenti opere di difesa, se non dei pennelli in legno presso Lido di Spina Sud (FE) realizzati nel 1999. In questa cella sono stati però versati circa 92.000 m<sup>3</sup> di materiale tra il 1983 ed il 2000, proveniente da accumuli litoranei. Tutta la cella vanta la presenza di barre per tutto l'arco di tempo investigato. Preme ricordare che, a partire dagli anni '30, è in atto un processo di rettificazione delle

cuspidi fluviali, tra cui la foce del Reno (Fabbri, 1974), il quale ha comportato una notevole disponibilità di sedimento trasportato dalla corrente *longshore* verso Nord ed intercettato dal molo di Porto Garibaldi. Per tale ragione i lidi ferraresi Sud evidenziano un accrescimento continuo per tutto il periodo analizzato e dunque bilanci positivi, senza il bisogno di interventi di difesa.

Nella Cella III si osserva la stessa situazione descritta a Nord, con una corrente *longshore*, stavolta diretta verso Sud, che trasporta il sedimento eroso dalla cuspidale fluviale del Reno. I sedimenti intercettati dai moli di Porto Corsini (a Sud) vanno ad alimentare le spiagge di Marina Romea e Porto Corsini, le quali sono in costante avanzamento e caratterizzate dalla presenza di barre sommerse.

La costruzione nel 1989 di barriere foranee a circa 200 m dalla costa di Casalborsetti (RA), più o meno nella posizione in cui prima erano presenti barre sommerse, coincide con la scomparsa di queste ultime. E' importante menzionare però che in questo tratto vi è stato un forte contributo dall'esterno: infatti in questa cella sono stati versati, dal 1983 al 2000, ben 365.000 m<sup>3</sup> di sabbia proveniente da cave a terra, che hanno significativamente contribuito al bilancio positivo dei fondali, ma che non sembra aver incentivato la formazione di barre.

Inoltre, si vuole porre l'attenzione sulla realizzazione a fine anni '80 di una barriera aderente a Sud della foce del fiume Reno, presso il Poligono Militare di tiro. Qui le barre sommerse, presenti fin dai primi rilievi, continuano a permanere, anche se a maggiori profondità rispetto ai rilievi precedenti. Pertanto sembrerebbe che la presenza delle barriere aderenti non abbia inibito la formazione delle barre.

Per quanto riguarda la Cella IV, la foce di Fiumi Uniti ed i litorali limitrofi registrano un trend erosivo. I sedimenti erosi vengono trasportati verso Nord ed intercettati dal molo Sud di Porto Corsini: ciò determina un costante avanzamento della linea di riva a Marina di Ravenna e, in misura minore, a Punta Marina.

A Lido Adriano negli anni '70 vengono realizzate opere foranee a circa 200 m da costa e alla profondità di -2,2 m. In questa zona non vengono mai rilevate barre sommerse, ma con tutta probabilità, le barriere foranee potrebbero andare a sostituire

le barre. La costruzione di opere di difesa presso Lido Adriano ha spostato l'erosione in litorali che una volta erano stabili o in avanzamento, come quelli di Punta Marina, e che hanno iniziato a regredire: dopo gli anni '80. A causa di ciò, per tamponare il fenomeno erosivo, sono state messe in opera barriere in sacchi di sabbia (a 200 m da costa, alla profondità di -2,3 m), pennelli in massi ed eseguito un ripascimento nel 1989-91 di circa 900.000 m<sup>3</sup>. Mentre prima di questo periodo le barre erano presenti in maniera pressoché continua, nel rilievo degli anni '90 scompaiono per poi ricomparire nel 2000, quando le barriere in sacchi sono in gran parte distrutte.

Anche nel caso di Lido di Dante, come per Lido Adriano, le barriere foranee sono andate a sostituire le barre. Infatti nel 1995 sono state messe in opera barriere foranee e qui le barre, prima sempre presenti, nel rilievo del 2000 non vengono rilevate, nonostante sia stato effettuato anche un ripascimento di 65.000 m<sup>3</sup> di sabbia.

Nella Cella V, in particolare a Sud della foce del Torrente Bevano e tra Milano Marittima e Cesenatico, la linea di riva è stata dominata da avanzamenti costanti fino agli anni '70. Successivamente questo trend si inverte e tutto il tratto da Foce Bevano a Cesenatico è interessato da fenomeni erosivi, portando alla realizzazione di diverse opere di difesa per tentare di arrestare l'arretramento delle spiagge.

A Lido di Classe le barriere foranee sono state costruite nel 1989 a 180 m da costa. Qui le barre erano presenti dagli anni '60 fino agli anni '70, ma poi scomparvero nel rilievo degli anni '80. Negli anni '90 le barre ricompaiono ma oltre le barriere, per poi scomparire nuovamente nel rilievo del 2000.

A Lido di Savio, le barriere foranee sono state costruite negli anni '70 a 160 m da costa. Qui non sono mai state rilevate barre sommerse.

A Milano Marittima negli anni '60 le barre erano presenti, ma, dopo la realizzazione di barriere in sacchi negli anni '80 a soli 100 m da costa, non vengono più riscontrate nei rilievi successivi, sebbene questo litorale sia stato interessato, assieme a quello di Cervia, da un ripascimento di oltre 583.000 m<sup>3</sup> di sabbia tra il 1983 ed il 2000.

Presso il tratto a Nord del molo di Cesenatico non vi sono opere rigide ma sono stati eseguiti ripascimenti per un totale di circa 286.500 m<sup>3</sup> di sabbia versata, di cui

254.000 m<sup>3</sup> da cave a terra e 32.500 m<sup>3</sup> da accumuli litoranei. In questa zona le barre sono presenti in modo continuo per tutto l'intervallo temporale analizzato.

Per quanto riguarda la Cella VI, dagli anni '40 il litorale registra intensi fenomeni erosivi e per tale ragione fu realizzata una serie pressoché continua di barriere foranee, da Gatteo a Mare fino a Rimini, completata a fine anni '60, alla distanza di soli 100-150 m da costa. In tutto questo tratto i rilievi hanno mostrato la completa assenza di barre sommerse, ma la mancanza di rilievi precedenti alla realizzazione di opere impedisce di sapere se una volta le barre fossero presenti.

A Nord di Gatteo a Mare fino al molo di Cesenatico, le opere foranee sono state costruite tra il '78 e l'82 molto più al largo rispetto alla zona a Sud (300 m da costa). I ripascimenti eseguiti nell'intero tratto sono piuttosto esigui, in totale 6000 m<sup>3</sup>. In questo tratto, le barre sono state osservate nei vari rilievi, benché in maniera piuttosto discontinua all'interno del tratto protetto.

Nella Cella VII si rileva l'assenza di opere dal molo di Rimini fino a Riccione, infatti in questo tratto la linea di riva è stata in costante avanzamento per l'intero periodo analizzato. Qui la presenza e l'assenza di barre però si alternano dagli anni '60 agli anni '80, mentre diventano più o meno costanti negli anni '90 e 2000.

Più a Sud, fino a Misano, il litorale presenta dagli anni '60 un susseguirsi di scogliere radenti, pennelli e scogliere parallele fino a Riccione. Nonostante ciò, il lento ma progressivo arretramento della linea di riva presso Misano ha portato nel 1983 ad un intervento di ripascimento protetto da barriere sommerse in sacchi che ha apportato benefici alla spiaggia ed una temporanea stabilizzazione della linea di riva.

A Riccione, come a Misano Adriatico le barriere in sacchi sono state realizzate tra 150 e 200 m di distanza da costa, alla profondità di -2,8 - -3 m. Inoltre a Riccione sono stati versati 507.000 m<sup>3</sup> (291.000 da cava a terra e 216.000 da accumuli litoranei) e a Misano Adriatico 285.000 m<sup>3</sup> (235.000 m<sup>3</sup> da cave a terra e 50.000 m<sup>3</sup> da accumuli litoranei) di sabbia. In questo tratto le barre sono state riscontrate nei diversi periodi; sembrano infatti coesistere con le barriere in sacchi, che sono state realizzate a circa 200 m da costa, più distanti rispetto al caso di Milano Marittima.

Dall'analisi della variazione della profondità dei fondali emiliano-romagnoli, focalizzata sulla posizione delle batimetriche dei 5 m e degli 8 m per gli anni '68 e 2000, è emerso che entrambe le batimetriche hanno sperimentato da Nord a Sud un avvicinamento a costa, molto più pronunciato per i -8 m. Il massimo abbassamento dei fondali è stato registrato presso le foci fluviali del Reno, dei Fiumi Uniti e del Bevano, correlabile con lo smantellamento delle cuspidi fluviali già descritto. La pendenza media dei fondali compresi tra la linea di riva e la batimetrica dei 5 m è aumentata in 32 anni da 0,37° a 0,45°, accentuandosi appunto in corrispondenza delle foci fluviali.

CELLE	ZONA	OPERE RIGIDE				RIPASCIMENTI			
		Tipo	Anno	Dist. da costa	Profondità	Volume	Anno	Fonte	
1	L.Volano – P.Garibaldi	L. Nazioni - P. Garibaldi (FE)	barriere foranee	1966 - 71	200	-2.3	41.000	1983 - 2000	accumuli lit.
2	L.Estensi – Foce Reno	L. Estensi -. F. Reno (FE)	-	-	-	-	92.000	1983 - 2000	accumuli lit.
3	F. Reno – P.Corsini	Casalborsetti (RA)	barriere foranee	1989	200	-	365.000	1983 - 2000	cave a terra
		Poligono Mil. (RA)	barriera aderente	anni '90	0	0			
4	Marina di Ravenna - F. Bevano	Lido Adriano (RA)	barriere foranee	anni '70	200	-2.2	-	-	-
		Punta Marina (RA)	barriere in sacchi	1989-90	200	-2.3	900.000	1989-91	cave a terra
		Lido di Dante (RA)	barriere foranee	1995	1990	-3.5	65.000	1996	cave a terra
5	F.Bevano – Cesenatico	Lido di Classe (RA)	barriere foranee	1989	180	-	-	-	-
		Lido di Savio (RA)	barriere foranee	anni '70	160	-	-	-	-
		Milano M.ma (RA)	barriere in sacchi	1983	100	-	583.000	1983 - 2000	cave a terra
		Cervia (RA)	-	-	-	-			
		Cesenatico N (FC)	-	-	-	-	254.000 + 32.500	1983 - 2000	cave a terra + accumuli lit.
6	Cesenatico – Rimini N	Cesenatico S. (FC)	barriere foranee	anni '80	300	-2.8	4.000	1983 - 2000	accumuli lit.
		Gatteo a M. (FC) - Viserba (RN)	barriere foranee	prima del '68	100-150	-2.8	2.000	1983 - 2000	accumuli lit.
7	Rimini S.– Cattolica	Riccione (RN)	barriere in sacchi	anni '80	150-200	-2.8	291.000 +216.000	1983 - 2000	cave a terra + accumuli lit.
		Misano A. (RN)	barriere in sacchi	anni '80	150-200	-3	235.000 +50.000	1983 - 2000	cave a terra + accumuli lit.

Tab. 4.9 - Tabella riassuntiva della presenza di opere di difesa e della realizzazione di ripascimenti nel litorale emiliano-romagnolo per l'intervallo di tempo considerato.



## 5 La difesa della costa con strutture rigide

---

Nell'ultimo secolo, a livello mondiale, sono state sperimentate numerose metodologie di intervento di difesa costiera, al fine di mitigare gli impatti di eventi erosivi sulle coste (Schwartz, 2005). In Italia, il problema della difesa degli arenili dall'azione erosiva del mare assume un peso rilevante dagli anni '50-'60, in concomitanza con l'esplosione del turismo di massa e con l'insistenza su questa stretta fascia di terra di sempre maggiori interessi e pressioni socio-economiche.

In realtà le prime opere realizzate in Italia risalgono a fine '800, costituite principalmente da barriere aderenti, con lo scopo principale di impedire ogni arretramento della linea di riva che potesse interferire con il sistema viario o con gli edifici costruiti in prossimità della costa, e senza alcun riguardo circa il valore naturalistico e paesaggistico dell'ambiente costiero. Chiaramente tali interventi sono stati eseguiti inseguendo esigenze ed emergenze, senza alcuna programmazione e coordinazione tra i vari enti che operavano sul litorale (Mancinelli et al., 2005).

Tali opere aderenti a costa, costituite da vari materiali come massi naturali o blocchi prefabbricati o muri in calcestruzzo, determinarono però processi irreversibili sull'assetto costiero (Pranzini, 2011), rendendo difficile una naturale ricostituzione dell'arenile. La riflessione delle onde incidenti sull'opera crea una turbolenza che determina fenomeni di escavazione al piede, messa in sospensione di materiale e innesco di flussi diretti verso il largo che spingono tale sedimento *offshore*. Ne conseguono un approfondimento dei fondali e una minor dissipazione delle onde che si approssimano a costa. Inoltre, l'escavazione alla base può facilmente portare all'instabilità della struttura stessa. Tale problema viene risolto mediante la disposizione di pietrame al piede (APAT, 2007).

Successivamente vengono realizzate opere di difesa longitudinali distaccate da costa, le barriere foranee. L'effetto principale atteso è la riduzione dell'altezza d'onda nella zona di surf nel lato verso dovuto al frangimento indotto sull'opera (Dean et al., 1997; Zanuttigh and Van der Meer, 2006).

Tali opere, considerate un efficace intervento di difesa dall'erosione (Tomasicchio e Tomasicchio, 2010) furono realizzate in numerose coste italiane, ma venne posta poca attenzione alle modalità progettuali, tra cui l'ampiezza della berma. Generalmente venivano realizzate con ampiezze di circa 3 m, assolutamente insufficienti per contenere la caduta del frangente e causando un'erosione nel lato interno dell'opera. Inoltre venivano trascurati anche gli effetti sui litorali sottoflutto e tra i varchi tra le barriere stesse (Aminti et al., 2005; Mancinelli et al., 2005). Sono stati numerosi gli esperimenti in canaletta per comprendere il meccanismo di abbattimento dell'energia dell'onda ed il trasferimento dell'energia sopra la berma, in funzione di onde lunghe o onde corte (Aminti et al., 1983; Lamberti et al., 1985; Smith and Kraus, 1982). Oggi, ad esempio a Venezia, per incentivare il frangimento delle onde sulla berma delle foranee, sono state costruite barriere con una berma larga 60 m (Pranzini, 2011).

Se da un lato le barriere foranee sono state in grado di difendere il territorio, dall'altro hanno spostato il problema dell'erosione ai litorali limitrofi, creando un effetto domino che, ad esempio, in Emilia-Romagna ha portato in 70 anni alla costruzione di circa 60 km di opere di difesa rigide.

Inoltre le spiagge cambiano totalmente il loro aspetto, non più modellato dalle onde, che diventa spesso irregolare, cuspidato, con tomboli. Inoltre spesso i fondali protetti diventano fangosi vicino a costa, a causa della maggior deposizione di sedimento sottile.

Altro effetto collaterale è la tracimazione che si verifica ad opera del mare durante le mareggiate, che determina un surplus di volume d'acqua che tende ad uscire attraverso i varchi innescando forti correnti di ritorno che oltre ad essere pericoloso per l'incolumità dei bagnanti, causa una forte escavazione al fondo.

Per tale ragione alle barriere foranee emerse man mano sono state preferite quelle semi-sommerse, che apparentemente andavano a ridurre quegli effetti negativi permettendo una miglior circolazione delle acque migliorandone la qualità, una minor riflessione delle onde ed una minor dispersione del sedimento verso il largo, comportando dunque un impatto minore sul sistema morfodinamico (Liberatore, 1992; Lamberti and Mancinelli, 1996). Per ovviare al problema dell'escavazione nei varchi spesso viene realizzata una soglia, in modo da ridurre il volume d'acqua in

uscita. Ne consegue però una maggior velocità della corrente *longshore*. A questo punto l'ingegno umano ha ben pensato di costruire dei pennelli trasversali, raccordati alle barriere foranee, per intercettare il sedimento in transito. E' il caso di Punta Marina (RA), dove come risultato finale si sono create delle strutture a "celle" chiuse (Munari et. al., 2001).

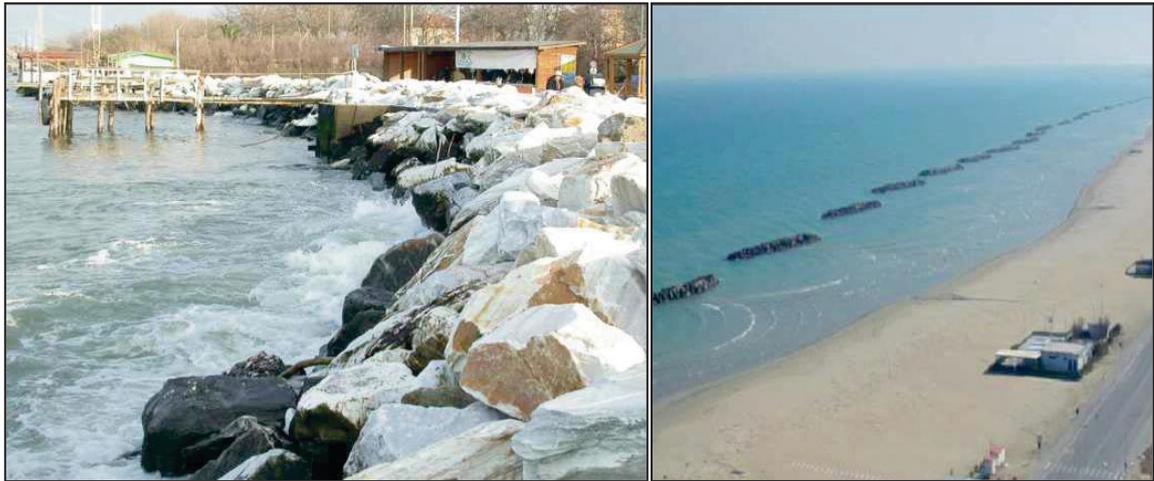


Fig. 5.1 - Barriera aderente (a) e barriere foranee (b) (Apat, 2007).

Nel caso di un importante trasporto litoraneo di sedimenti di spiaggia, generalmente vengono impiegati pennelli (Tomasicchio e Tomasicchio, 2010), nati per intercettare e bloccare il sedimento trasportato. Chiaramente se l'attacco ondoso prevalente è quello frontale, i pennelli, invece di difendere il tratto costiero, diventano dannosi perché comportano l'allontanamento verso il largo dei sedimenti più fini.

La perdita di sedimento verso il largo oltre la testata del pennello è stata impedita mediante la realizzazione di variazioni di forma in corrispondenza delle testate: pennelli a T (*T-Shaped*), a Y (*Fish-tail*), o anche pennelli che si chiudono con un tratto parallelo alla costa (*L-Shaped*). Anche per i pennelli sono state sperimentate le versioni sommerse, anche in geotessuto (Pranzini et al., 2011) che hanno l'indubbio vantaggio di non bloccare completamente il transito dei sedimenti, comportano un avanzamento della linea di riva ed un sollevamento dei fondali.

Tra le opere rigide si citano anche i drenaggi artificiali delle spiagge (BMS) che hanno lo scopo di favorire l'infiltrazione dell'acqua in battigia.

Questa scelta di combattere i processi naturali ha nel tempo dimostrato l'occorrenza di "effetti collaterali" in prossimità delle strutture poiché, alterando le condizioni idro-sedimentarie nel paraggio, il problema erosivo spesso veniva trasferito e le morfologie naturali fortemente alterate generando escavazioni profonde a tergo delle strutture, spiagge pensili, ecc.

Fra le tante soluzioni difensive proposte, benché poco diffuse ed ancora in fase di studio, in quanto fortemente innovativi, rientrano gli *Artificial Reef*, ossia delle strutture semipermeabili in calcestruzzo, nate per favorire lo sviluppo della flora e della fauna marina e da poco impiegate per la difesa costiera (APAT, 2007).

## 5.1 I reef artificiali

---

Fra gli interventi non convenzionali vi è quella tipologia di opere che, pur presentando le connotazioni peculiari di interventi rigidi, sono basate su tecniche, forme o materiali innovativi, come gli *Artificial Reef*.

I moduli di reef artificiali (appartenenti alla categoria delle low-crested structures, LCS) (Mead and Black, 1999) sono delle strutture sommerse semi-permeabili realizzate con differenti materiali e forme, in grado di ridurre l'energia del moto ondoso provocandone il frangimento e trasmettendone una limitata quantità attraverso la struttura (Pilarczyk, 2005). Queste strutture possono essere assemblate sia a terra che in acqua e sono definite "intelaiate" in quanto sono altamente permeabili.

Essendo in grado di assorbire parte dell'energia dell'onda, secondo alcuni studi (Harris et al., 2004; Harris, 2009; Black, 2001) dovrebbero produrre due effetti:

l'onda viene scomposta in più direzioni e perciò la sua energia viene parzialmente dissipata;

le piccole turbolenze che esse generano inducono la deposizione sul fondo dei sedimenti fini.

Inoltre queste strutture, sono state pensate in modo da resistere alle spinte delle correnti o agli effetti di trascinamento delle reti ed in modo da resistere alle

sollecitazioni del moto ondoso, contrastare gli effetti di trascinamento delle reti da pesca ed evitare l'affondamento della struttura nel fondale. Infine, esse favorirebbero il ripopolamento ittico dei fondali marini, in quanto forniscono tane, anfratti e vie di fuga per le prede.

Essendo barriere sommerse, generalmente l'attenuazione dell'onda incidente aumenta con l'altezza d'onda, come per le LCS (Mancinelli et al., 2005). Durante i climi d'onda meno energetici, tale attenuazione non avviene oppure è fortemente ridotta, determinando così scarsi disturbi alla circolazione idrosedimentaria. E' durante periodi con onde alte ed energetiche che tale barriera mostra i suoi effetti, portando le onde al frangimento riducendone il potere erosivo.

Secondo diversi studi (e.g. Ranasinghe et al., 2001; Voorde et al., 2006; Jackson & Corbett, 2007), anche se le onde non frangono sulla barriera in reef, possono comunque favorire una certa stabilità della linea di riva, a causa degli effetti di rifrazione delle onde stesse. Infatti, quando si verifica il frangimento con onde oblique rispetto l'orientazione della linea di riva, la corrente lungocosta che si genera può trasportare del sedimento. Maggiore è l'angolo di incidenza, maggiore sarà l'energia di tale corrente e quindi maggiore sarà anche il trasporto sedimentario. Come le onde arrivano nei fondali meno profondi subiscono rifrazione e la loro direzione diventa pressoché parallela alla linea di riva. Ma per onde che attraversano barriere in reef, sufficientemente ampie e poco profonde, questa rifrazione e "rotazione" può ridurre la velocità della corrente *longshore* e quindi il trasporto sedimentario (Mead and Black, 2002).

La barriera in reef è progettata con lo scopo di non alterare il fondale creando gradini morfologici come avviene con le barriere tradizionali. Infatti la particolare geometria dei reef artificiali fa sì che grazie alla loro permeabilità il profilo di spiaggia sommersa rimanga piuttosto naturale e stabile.

Per quanto riguarda il loro impiego, generalmente, sono stati utilizzati a scopo turistico, in quanto progettati per favorire la formazione di onde da surf o per il ripopolamento ittico. In realtà ne esistono di svariati tipi tra cui i cosiddetti *multi-function artificial reefs*. Un esempio è il reef realizzato a Narrowneck, Gold Coast (Australia) con lo scopo di proteggere la costa e garantire onde da surf (Ranasinghe et

al., 2006) o l'*artificial reef* installato a Cable Station, Western Australia, costruito con la sola funzione di migliorare le condizioni di frangenza delle onde per il surf, producendo regolarmente onde di qualità per i surfisti. Non è mai stato inteso come struttura di protezione della spiaggia (Ranasinghe et al., 2001).

Il *Pratte's Reef* (El Segundo, Los Angeles County, USA) (Borrero and Nelsen, 2003) e il *Reef di Boscombe* (Bournemouth, UK) (Rendle and Esteves, 2010) o le diffuse barriere di *Reef Ball*<sup>TM</sup> (Cayman Islands, Antigua, o presso la costa della Repubblica Dominicana) (Fig. 5.2) si sono mostrate efficaci nella stabilizzazione della costa e nel miglioramento della qualità dell'habitat marino, ma hanno comportato escavazioni alla base delle strutture (Smith et al., 1998).

In particolare, il primo progetto eseguito mediante *Reef Ball*<sup>TM</sup> presso la costa sud caraibica della Repubblica Dominicana nel 1998 ha visto l'impiego di 450 *Reef Ball*<sup>TM</sup>. Tali unità erano alte circa 1,2 m con una base di diametro 1,5 ed un peso di circa 1600 Kg, e sono state installate alla profondità di 1,6-2 m (sommersione 0,3-0,8 m). Nonostante l'avvento di ben due uragani, le *Reef Ball*<sup>TM</sup> non hanno subito danneggiamenti o spostamenti, ma piuttosto è stato osservato un effetto sulla linea di riva, che registrò un avanzamento dopo 3 anni in media di 11 m (Harris, 2009).



Fig. 5.2 – *Reef Ball*<sup>TM</sup> e foto aerea di una barriera composta da 5 linee di *Reef Ball* in Antigua (Caraibi) (Harris, 2003).

A Dubai, nel 2002 è stata realizzata una barriera in reef artificiali composta da 66 moduli *Tecnoreef*<sup>fTM</sup> alla profondità di circa -2,5 m.s.l.m con il fine di proteggere la

costa dall'erosione (Fig. 5.3). I risultati, dopo 9 mesi dalla messa in opera dei moduli del reef, hanno evidenziato la rottura di alcuni moduli e l'instaurarsi di una corrente di rip in grado di erodere il sedimento nella parte protetta dalla struttura e di trasportarlo al largo depositandolo nella zona offshore della barriera in reef.

Il budget sedimentario nel tratto protetto dal reef è risultato dunque negativo, mentre nei fondali al largo è risultato positivo. Tale effetto secondo il monitoraggio condotto per conto dalla ditta sembra essere dovuto proprio alla rottura dei moduli che non sono stati in grado di ostacolare la dispersione del sedimento verso il largo (Fontolan, 2003).

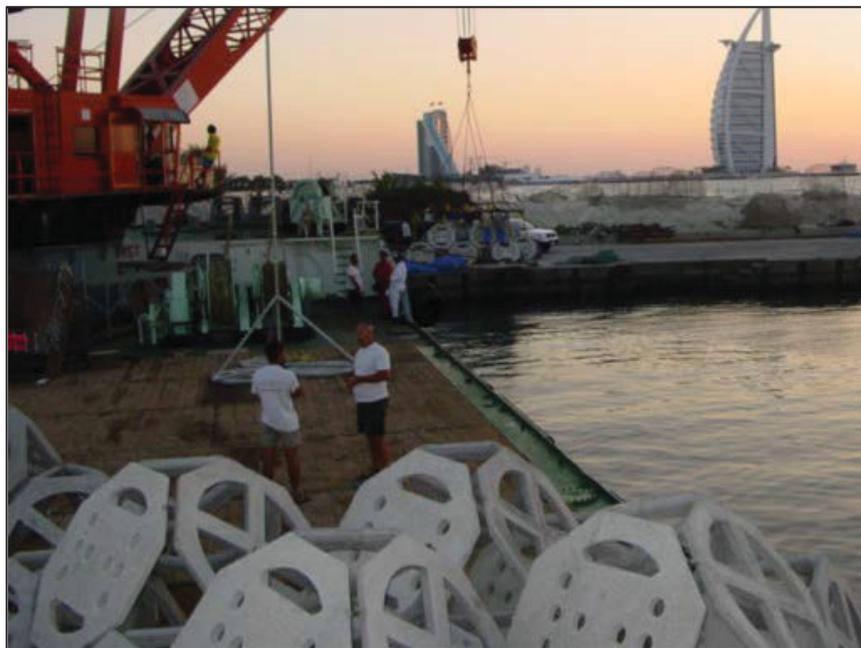


Fig. 5.3 – Messa in opera dei Tecnoreef™ presso Jumeira Beach, Dubai, nel 2002.

Sono numerose le ditte che progettano e mettono in vendita le più svariate tipologie di moduli, con forme, pesi e materiali di vario genere. Per lo più utilizzate per ripopolamento ittico o per incentivare la formazione di onde da surf, risulta estremamente necessaria una sperimentazione per capirne gli effetti idrodinamici e morfologici che hanno sul litorale. Come è emerso dal monitoraggio del reef costruito a *Boscombe*, sembrano sorgere dei problemi relativi a fenomeni erosivi accentuati alla base della struttura. In mancanza di un quadro chiaro della situazione, Rendle &

Esteves (2010) non hanno potuto constatare se queste escavazioni siano state occasionali, né se abbiano potuto avere degli effetti negativi sulle funzioni del *reef*.

Ranasinghe et al. (2006) ed Harris (2009) sostengono invece che molti progetti sperimentali abbiano subito cedimenti della struttura del *reef* dovuti sostanzialmente all'escavazione alla base.

Per quanto riguarda invece l'effetto sull'evoluzione della linea di costa, Ranasinghe & Turner (2006) sostengono che la risposta della linea di costa a queste opere è un argomento tutt'ora confuso e dibattuto. Sebbene alle barriere coralline sommerse sia spesso associata la formazione di cuspidi e tomboli, indicando un'effettiva protezione della costa (Komar, 1976), le scarse pubblicazioni sulla risposta della linea di costa a queste strutture non permettono di affermarne la reale efficacia.

Da questo emerge la mancanza di dati certi ed un'ampia casistica alle spalle, sostenuta da studi e ricerche e sperimentazioni seguite da monitoraggi di medio-lungo termine.

## 6 Inquadramento dell'area di studio

Il sito campione è ubicato presso la località di Punta Marina Terme, una frazione del Comune di Ravenna, situata a circa 9 km dalla città. In particolare, il tratto litoraneo esaminato è situato circa 4 km a meridione del molo di Porto Corsini ed è caratterizzato da una spiaggia sabbiosa fiancheggiata da una grande pineta.



Fig. 6.1 - Ubicazione del sito campione, presso Punta Marina (RA).

## 6.1 Inquadramento geologico – strutturale

---

Il territorio in esame, localizzato nella regione Emilia-Romagna, appartiene al contesto geologico-strutturale dell'avanfossa appenninica, compreso tra la catena appenninica a Sud e quella alpina a Nord. In questa avanfossa si sono depositati grandi spessori di sedimenti, durante il Terziario e il Quaternario.

Verso la fine del Pliocene (1.6-1.8 milioni di anni fa), l'area della Pianura Padana era sede di un bacino marino, situato tra le Alpi e gli Appennini (Fig. 6.2) (Vai, 1988; Ricci Lucchi et al., 1990), che durante tutto il Quaternario ha continuato a riempirsi di materiali alluvionali, portati al mare dai fiumi. L'ingente spessore di sedimenti, circa 5 km dalla base del Pliocene, è il frutto di un forte apporto alluvionale; associata ad una forte subsidenza, dovuta a processi compressivi (Fig. 6.3).

L'evoluzione sedimentaria Plio-quadernaria del bacino padano registra una generale tendenza "regressiva", registrata da depositi marini di ambiente via via meno profondo fino a depositi continentali.

Il riconoscimento di una superficie di *unconformity* di significato regionale ha consentito il primo inquadramento stratigrafico di tipo sequenziale della successione quadernaria affiorante del margine appenninico (Fig. 6.2), portando alla identificazione di due cicli sedimentari principali, uno marino (Qm) ed uno continentale (Qc) (Ricci Lucchi et al., 1982; Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998; Nuova Carta Geologica d'Italia 1:50000 F.218 - F. 254).

La superficie di discontinuità che separa i due cicli è stata identificata anche nel sottosuolo della Pianura Padana, in corrispondenza del limite tra il Supersistema del Quaternario Marino (corrispondente al ciclo Qm di Ricci Lucchi et alii, 1982) ed il sovrastante Supersistema Emiliano-Romagnolo (equivalente al ciclo Qc).

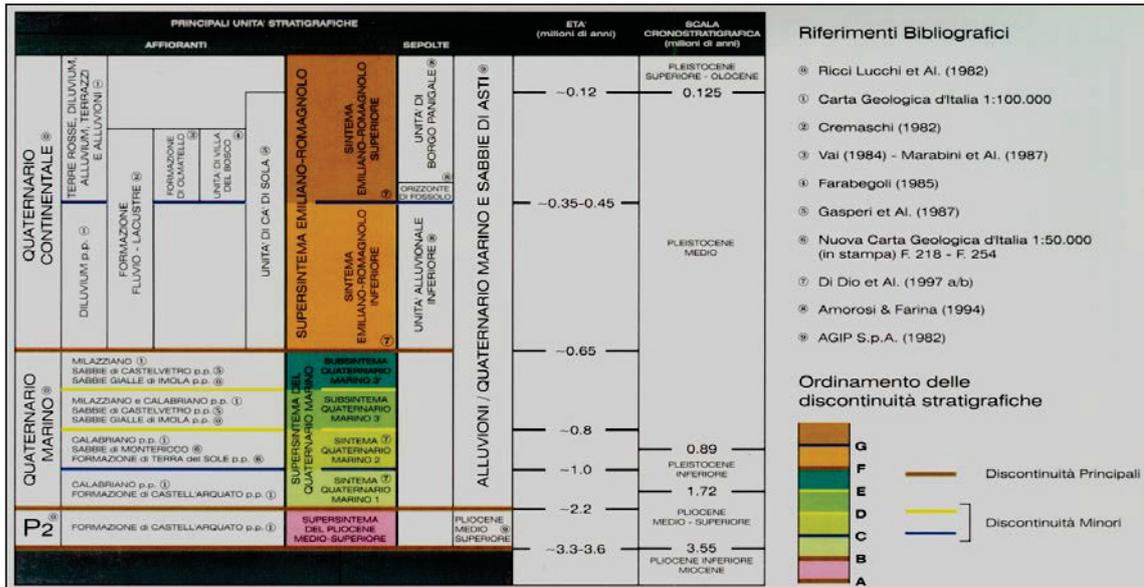


Fig. 6.2 - Schema stratigrafico e suddivisione stratigrafico sequenziale dei depositi plio-quadernari del bacino padano (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998).

L'area presenta una configurazione tettonica profonda caratterizzata da allineamenti strutturali ad andamento appenninico da NO-SE, con varie culminazioni e depressioni assiali (Fig. 6.3), che registra movimenti orogenetici pre-pliocenici e medio pliocenici.

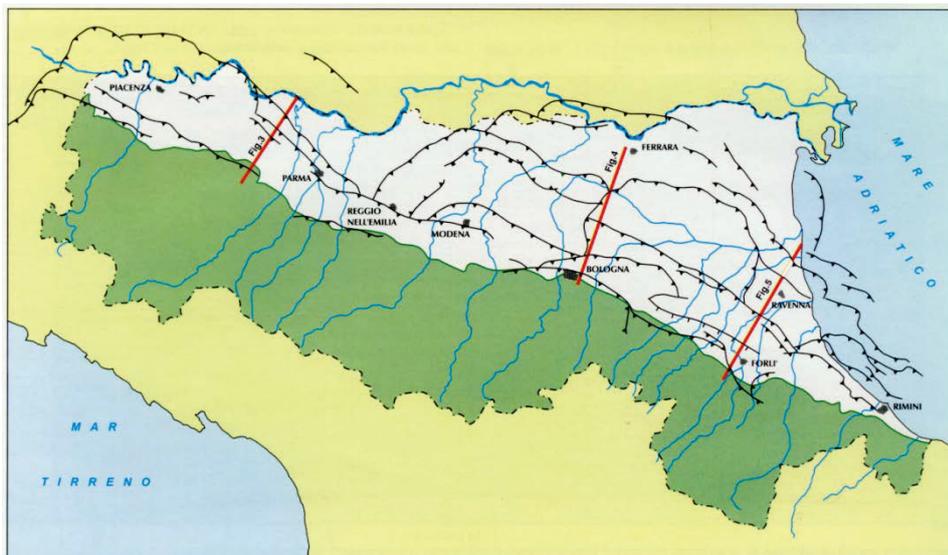


Fig. 6.3 - Principali strutture sepolte dell'Appennino settentrionale (da Pieri & Groppi, 1981, modificata).

Le ricerche Agip hanno messo ben in luce che la struttura tettonica dell'Appennino prosegue entro la vasta avanfossa per alcune decine di chilometri verso nord, sepolta nella pianura (Pieri & Groppi, 1981). Essa è costituita da un sistema di accavallamenti con superfici di sovrascorrimento a basso angolo, che immergono verso S-SO e che hanno un trasporto verso N-NE. Ne deriva una serie di strette anticlinali intervallate da larghe sinclinali.

I sedimenti Quaternari (depositi marini, deltizi, di piana alluvionale) che poggiano e livellano le strutture fagliate e ripiegate del substrato pre-pleiocenico e pliocenico. Nell'area di Ravenna e del Delta del Po, il Quaternario presenta degli spessori massimi di 2.000-2.500 m in corrispondenza delle principali depressioni strutturali e minimi di 1.500 m in corrispondenza delle strutture positive sepolte con un assetto strutturale che ricalca, attenuandola, la geometria dei depositi sottostanti. I depositi marini del Pleistocene medio-superiore si adeguano a questo stile; essi sono riferibili ad ambienti deposizionali poco profondi come quelli adriatici attuali, ma hanno spessori che testimoniano una subsidenza continua per tutto il periodo (Selli & Ciabatti, 1977; Sestini, 1992; Farabegoli, 1998).

Da sottolineare come solo nei depositi alluvionali del Pleistocene superiore la geometria degli strati riflette una topografia ed idrografia paragonabile all'attuale che, in particolare, assume una lieve pendenza verso E-NE, parallela cioè alla direzione di deflusso dei corsi d'acqua appenninici.

Le indagini effettuate durante la fine degli anni '90, evidenziano come, nell'ultimo ciclo glacio-eustatico, si passi da una fase di prolungata emersione (*low-stand*), comprendente l'ultimo massimo glaciale ed in cui si è sviluppato un sistema di piana alluvionale, alla formazione di un sistema barriera – laguna, dovuto all'innalzamento del livello del mare, che ha subito rapidi spostamenti durante la fase trasgressiva. In questa fase si è avuta la deposizione di sabbie, da siltose a molto fini, con intercalazioni di argille siltose ricche di resti biogenici marini. Questi depositi si sono accumulati in un ambiente litorale di alta energia a cui, all'incirca tra gli 8.000 e i 5.000 anni fa, è seguita l'attuale fase di *high-stand* del livello marino che nell'area ha portato la linea di costa molti chilometri all'interno rispetto all'attuale (Fig. 6.4). Da questa fase si è avuta la costruzione del paleo-delta del Po ai lati del quale si sono sviluppate piane costiere,

migrate in direzione W-E durante la progradazione deltizia determinando l'isolamento di lagune poco profonde allungate e di paludi nell'entroterra (Amorosi et al., 1999).

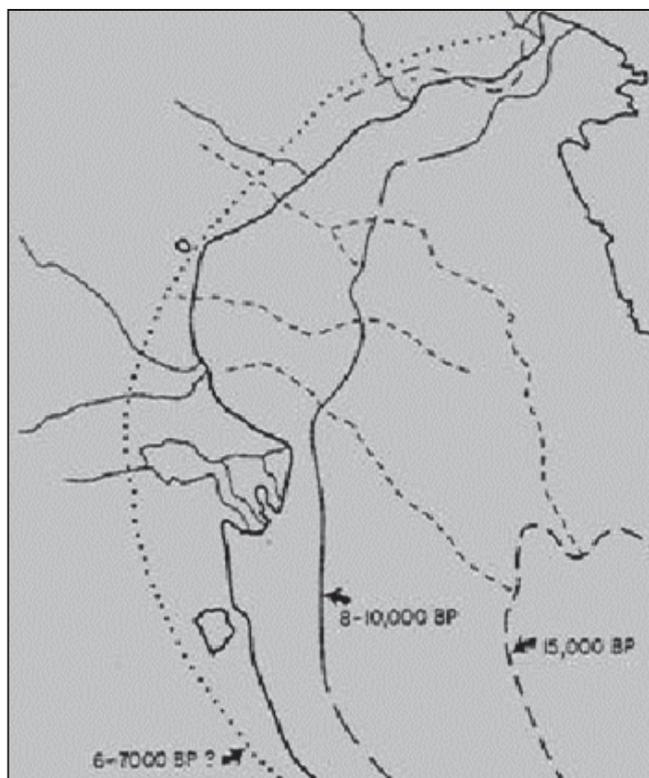


Fig. 6.4 - Ubicazione delle probabili linee di costa succedutesi durante l'ultima trasgressione glacioeustatica (Sestini, 1992).

### 6.1.1 Stratigrafia del territorio in esame

---

Il sottosuolo della piana costiera romagnola è caratterizzato dall'organizzazione ciclica di depositi marini e continentali quaternari, per uno spessore di alcune centinaia di metri.

Lo studio dei profili sismici di Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP (1998) mostra un quadro stratigrafico generale dei depositi quaternari nell'area ravennate, con uno spessore complessivo del Supersistema Emiliano-Romagnolo di circa 6-700 m, suddiviso nel Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore e Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (Fig. 6.2). All'interno di quest'ultimo sono state individuate unità di rango inferiore (Subsistemi) che registrano l'alternanza di depositi marini e continentali.

La quasi totale assenza di rilievo nell'area del Foglio Ravenna fa sì che i terreni affioranti (età olocenica) siano riferibili alla parte sommitale del Subintema più recente (Subintema di Ravenna, Fig. 6.2), corrispondente ai sedimenti accumulatisi durante l'episodio trasgressivo post- 18.000 anni B.P. (Regione Emilia-Romagna, 1999).

#### *Il Supersintema Emiliano-Romagnolo*

E' l'unità stratigrafica che comprende l'insieme dei depositi quaternari di origine continentale affioranti al margine appenninico padano e i sedimenti continentali e marini ad essi correlati nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola. Questi ultimi includono depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini organizzati in successioni cicliche di vario ordine gerarchico. In affioramento, al margine appenninico padano, il Supersintema Emiliano-Romagnolo coincide con il ciclo Qc di Ricci Lucchi et al. (1982) e presenta un limite inferiore inconforme, evidenziato nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola da una discordanza angolare sui depositi litorali delle Sabbie di Imola (ciclo Qm3 di Regione Emilia\_Romagna & ENI-AGIP, 1998). Il limite superiore coincide con il piano topografico.

#### *Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore*

Costituisce la parte superiore del Supersintema Emiliano-Romagnolo e comprende tutti i depositi continentali, deltizi, litorali e marini organizzati in successioni cicliche di alcune decine di metri di spessore.

Nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola, il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore appoggia, localmente in discontinuità stratigrafica, sul Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore ed è suddivisibile in quattro cicli deposizionali (Amorosi and Farina, 1995). Il limite superiore corrisponde all'attuale superficie topografica. Nell'area ravennate il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore ha spessore compreso tra 250 e 290 m. L'età è attribuibile al Pleistocene medio-Olocene (circa 400.000 anni B.P – attuale). La porzione più investigata è nei 120 m sommitali (Fig. 6.5).

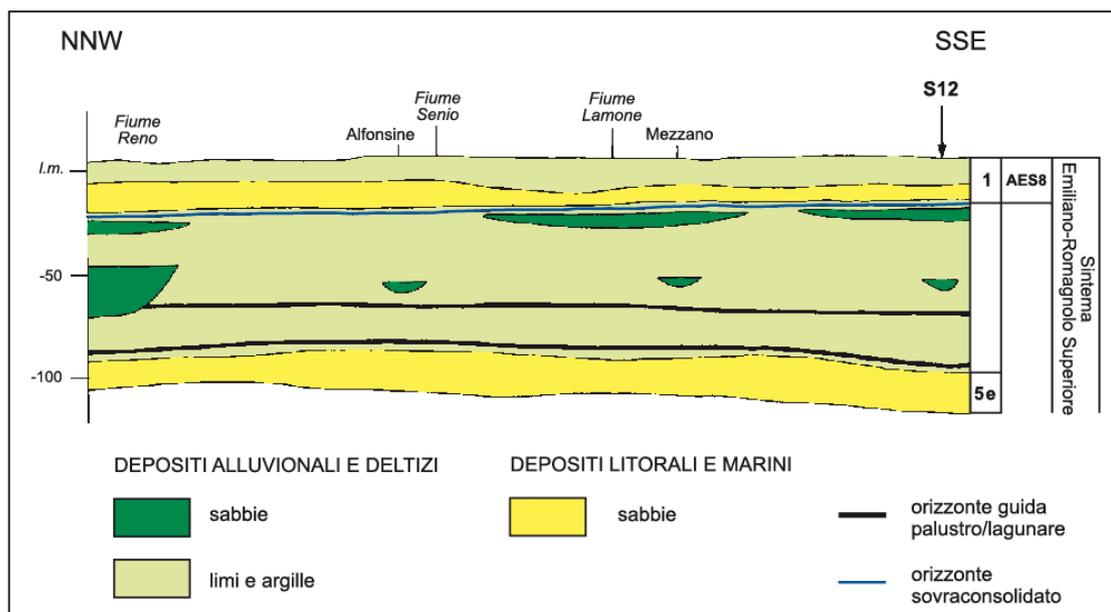


Fig. 6.5 - Sezione stratigrafica rappresentante la parte sommitale del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore nell'area del Foglio Ravenna. AES8=Subsintema di Ravenna. (Regione Emilia-Romagna, 1999).

Al di sotto dei sedimenti litorali, localmente affioranti, di età olocenica, attribuibili all'ultimo episodio trasgressivo quaternario (Subsintema di Ravenna), i primi depositi litorali e marini che si incontrano verso il basso sono rappresentati da un corpo tabulare alla profondità di circa -100 m s.l.m., costituito da sabbie litorali e subordinatamente da argille di prodelta e transizione alla piattaforma. Al di sopra di questi sedimenti marini sono presenti alcune decine di metri di depositi prevalentemente argillosi di piana deltizia.

La comparsa, intorno a -50/-70 m s.l.m di corpi sabbiosi nastriformi, interpretati come depositi fluviali di valle incisa, segna il passaggio ai sedimenti alluvionali che costituiscono la porzione del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore immediatamente sottostante il Subsintema di Ravenna. Questo intervallo è dominato da argille e limi di piana inondabile, con subordinate sabbie di canale (Fig. 6.5, Regione Emilia-Romagna, 1999).

Al tetto dei depositi alluvionali è presente su gran parte dell'area un orizzonte sovraconsolidato che costituisce la base del Sintema di Ravenna.

*Subsistema di Ravenna (AES8)*

E' l'elemento sommitale del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (Fig. 6.6 e Fig. 6.7) e comprende sabbie, argille e limi di ambiente alluvionale, deltizio e litorale, organizzati in corpi lentiformi, nastriformi e tabulari di spessore plurimetrico. Il limite inferiore, non affiorante nel Foglio Ravenna, è inconforme. Il limite superiore coincide con il piano topografico. Nell'area ravennate l'unità ha uno spessore compreso tra 20 e 28 m ed è datato 8.790 anni-attuale.

- *Unità di Modena (AES8a)*

Nella parte sommitale del Subsistema di Ravenna viene distinta un'unità sintemica di rango inferiore (Unità di Modena), costituita da sabbie, argille e limi di ambiente alluvionale e deltizio-litorale, organizzati in corpi lenticolari, nastriformi e tabulari di spessore plurimetrico. La porzione basale è caratterizzata dalla frequente presenza di sedimenti ricchi di sostanza organica, palustri e/o lagunari di natura trasgressiva che si accompagnano ad una generale disattivazione dei sistemi fluviali del ciclo sottostante ed ad un generale spostamento verso monte dei sistemi deposizionali.

Nei settori di bassa pianura la base di AES8a è individuata dal contatto, in discontinuità, da depositi delle sue tracimazioni fluviali sul suolo non calcareo o scarsamente calcareo di AES8, che contiene i reperti in posto di epoca romana o più antica. Il tetto di AES8a è dato da un suolo poco evoluto, calcareo, di pochi decimetri di spessore e generalmente di colore bruno olivastro o bruno grigiastro. Il limite inferiore è datato al periodo post-romano e segna l'instaurarsi di un'importante fase di deterioramento climatico tra il IV e il VI sec. d.C. che determinò un aumento della piovosità, con conseguente modifica della rete idrografica e alluvionamento della pianura. Nell'area ravennate gli effetti del cambiamento climatico sono registrati nell'incremento del tasso di sedimentazione, con conseguente seppellimento degli elementi infrastrutturali della colonizzazione e bonifica romana. Lo spessore dell'Unità di Modena varia da 0 a 5,5 m (Regione Emilia-Romagna, 1999).

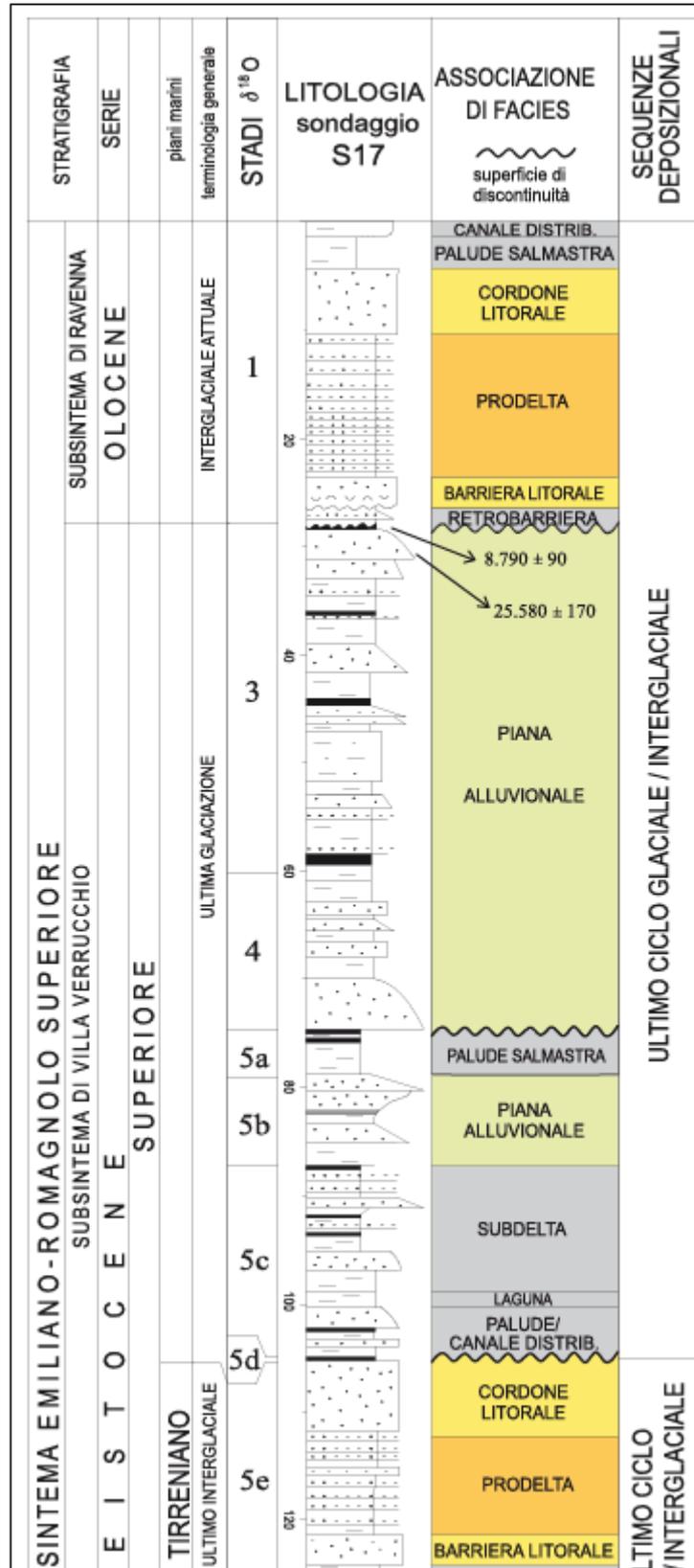


Fig. 6.6 - Sedimentologia del sondaggio a carotaggio continuo S17 (modificato da Amorosi et al., 1999)

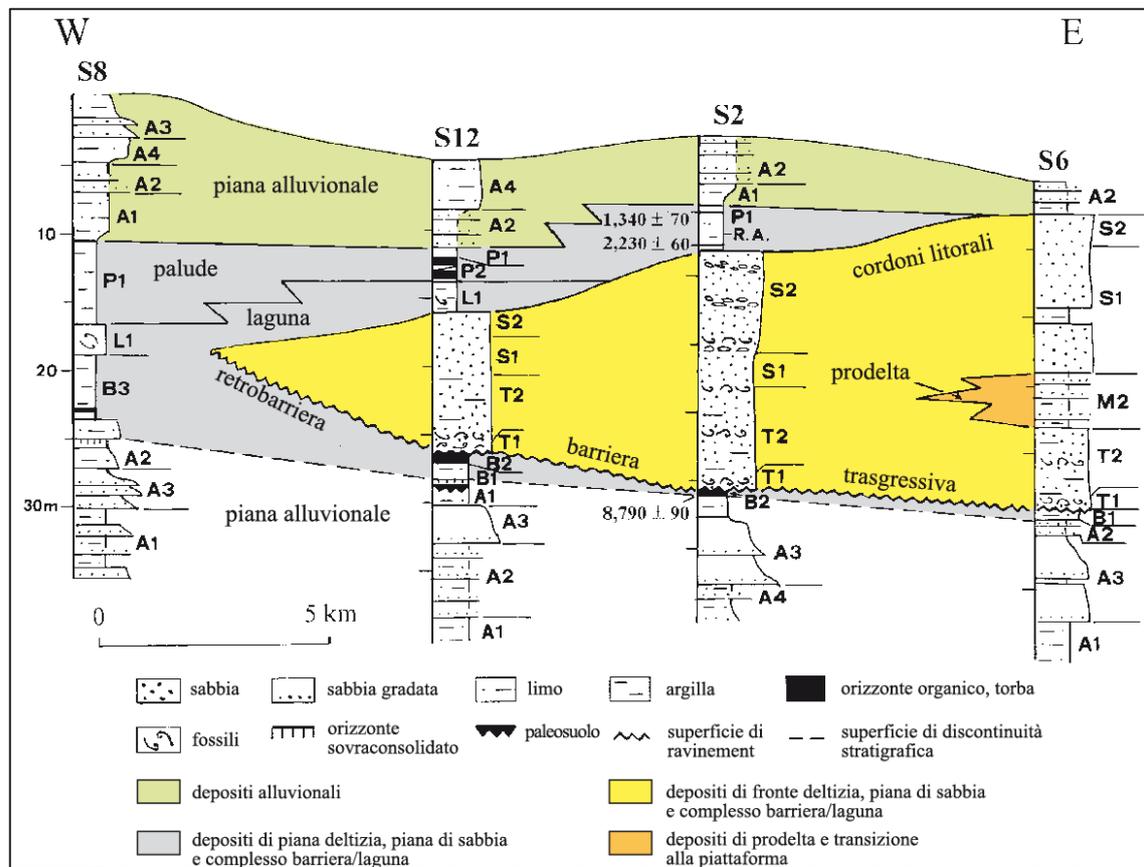


Fig. 6.7 – Stratigrafica del Subsystema di Ravenna (modificato da Amorosi et al, 1999)

## 6.2 Inquadramento geomorfologico

L'evoluzione morfologica del territorio in cui è inserita l'area di studio è stata ricostruita con buon dettaglio da diversi autori (Ciabatti, 1968; Bondesan et al., 1978; Roncuzzi, 1993; Amorosi et al., 1999); essa è il risultato della complessa interazione di processi fluviali, marini costieri e tidali che hanno caratterizzato la dinamica deposizionale tardo-olocenica.

Questa evoluzione è intimamente legata alle dinamiche evolutive del delta del Po e, in particolare, a quelle del suo canale distributore più meridionale, il Primario, all'incirca corrispondente alla parte terminale del Fiume Reno attuale. Il Reno è stato responsabile della costruzione, in età tardo-olocenica, nell'area ravennate, di un lobo

deltizio di notevoli proporzioni. La crescita del delta era accompagnata dalla progradazione di un sistema costiero, attraverso la giustapposizione di cordoni litorali di età via via più recente.

A Sud del Primaro la sedimentazione avveniva invece in ambiente di piana alluvionale. L'intervento umano ha sensibilmente condizionato la sedimentazione, soprattutto nel corso degli ultimi secoli.

### 6.2.1 Inquadramento geomorfologico del territorio in esame

---

Il litorale dell'area in esame non presenta particolari articolazioni morfologiche naturali come baie o insenature. La sua stratigrafia è caratterizzata da un corpo di sabbie di spiaggia, progradato su fanghi marini, che a loro volta si sovrappongono su sedimenti limoso-argillosi, corrispondenti a più antichi depositi palustri e alluvionali

Sulla costa, lo spessore delle sabbie costiere, tendono poi ad annullarsi sui fondali posti ad una profondità variabile fra 5 e 7 m (Fig. 6.8).

In base alla classificazione proposta da Wright e Short (1983), che si basa su un continuo di "states" morfologici, associati ad un determinato livello energetico dell'ambiente litorale, la costa ravennate può considerarsi di tipo "dissipativo": un litorale caratterizzato cioè da un modesto gradiente topografico e da una vasta zona di "surf" delimitata inferiormente dalla linea più esterna dei frangenti e superiormente dal limite di "uprush" delle onde sulla battigia.

Tali caratteristiche rimangono sostanzialmente immutate per tutto il tratto costiero emiliano-romagnolo, fra l'apparato deltizio del Po sino alla zona di Rimini.

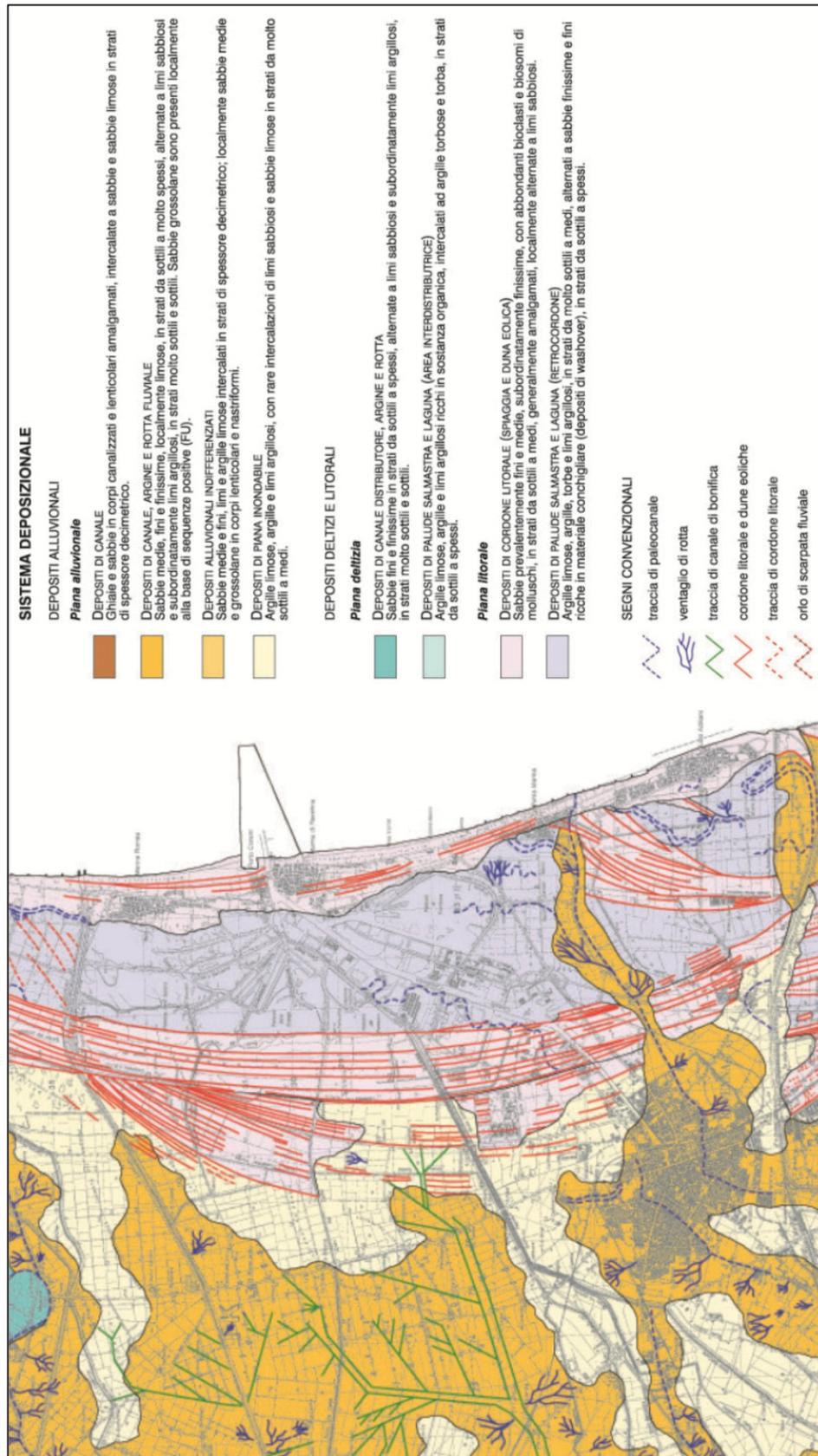


Fig. 6.8 – Estratto della Carta Geologica della Pianura Emiliano-Romagnola, scala 1:25.000 (Regione Emilia-Romagna, 1999).

In tutta l'area notevole interesse rivestono le zone dell'immediato retrospiaggia (*backshore*), a cominciare dall'apparato dunoso, ove presente, che la borda verso l'interno, con la duplice funzione di proteggere l'entroterra da mareggiate e da eventi di acqua alta e di fungere da serbatoio naturale di materiale nella stagione invernale, quando il regime del moto ondoso determina una situazione erosiva. Questi allineamenti dunari sono stati però in larga parte distrutti a partire dagli anni '60, per lasciare spazio ad attività turistico-ricreative, abitative e/o commerciali, portando ad una profonda alterazione del patrimonio paesaggistico ed ambientale con riduzione e degrado degli arenili.

Oltre le dune la zona interna è caratterizzata dalla presenza di zone umide, sia dolci che salate (come le piallasse Piombone e Baiona, oltre a numerose altre aree di particolare interesse naturalistico), pinete secolari, corsi d'acqua oggi quasi totalmente regimentati e zone fortemente urbanizzate.

### 6.3 La deriva litoranea nel tratto di studio

---

La deriva litoranea, e quindi il trasporto solido litoraneo, è funzione dell'azione combinata di marea, vento ed onde. Generalmente tali forzanti determinano un continuo movimento di sabbia, in sospensione e sul fondo, con una direzione dominante lungo il litorale, dominata dai flussi indotti dalle onde che si avvicinano alla costa con un certo angolo di inclinazione rispetto alla linea di riva. Chiaramente la corrente che ne deriva può essere rinforzata o ridotta da correnti generate dal vento o dalla marea (Komar, 1976). Maggiore è l'energia delle onde e maggiore sarà la quantità di sedimento messo in moto e la velocità della corrente che lo trasporta.

L'indicazione del verso della deriva litoranea è indirettamente fornita da dati anemometrici, morfologici, dagli effetti prodotti da opere sul profilo di spiaggia, dalla orientazione delle foci dei fiumi. Il dato quantitativo, espresso, generalmente, in metri cubi annui, deriva da calcoli basati sul clima ondoso, partendo dal presupposto che l'azione delle onde, tramite lo stress turbolento esercitato dalle particelle d'acqua sul

fondo, provochi la sospensione del sedimento e il trasporto ad opera delle correnti indotte dal moto ondoso.

Da studi pregressi (Bondesan et al., 1978) emerge che la direzione prevalente della deriva litoranea nel tratto studiato è da Sud verso Nord, in linea con quello dominante sul litorale emiliano-romagnolo (Fig. 6.9).

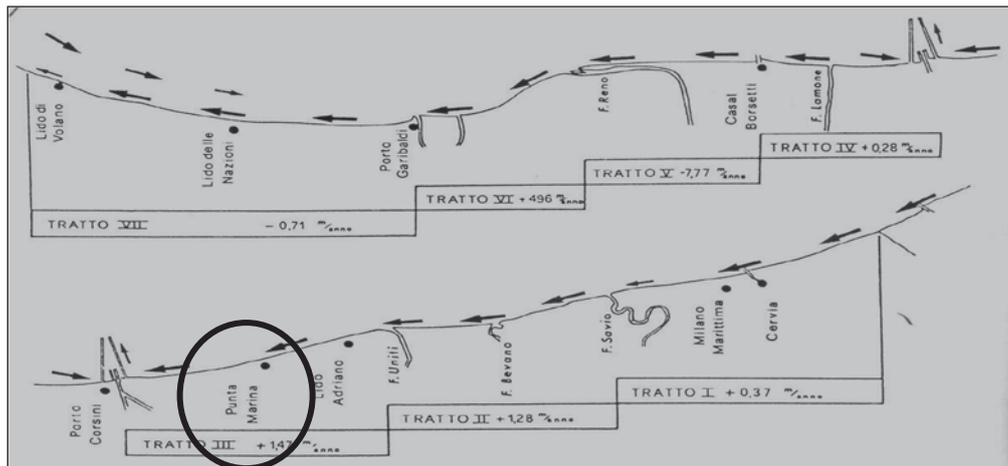


Fig. 6.9 - Schema del trasporto solido lungo costa (da Bondesan et al., 1978).

## 6.4 La subsidenza nel tratto di studio

L'analisi degli abbassamenti dovuti alla subsidenza prende in esame sia i risultati della campagna di livellazione del 2005 dell'Arpa Emilia-Romagna sia i risultati derivanti dall'analisi interferometrica di dati radar con tecnica PSInSAR<sup>TM</sup>, relativa al periodo 2005-2006; tale metodo satellitare risulta particolarmente efficace per la valutazione dei movimenti verticali del suolo se si dispone di un numero sufficiente di punti a terra (Arpa, 2009).

I risultati evidenziano che tra il 1999 ed il 2005, per una larghezza di 5 km dalla battigia, la subsidenza nell'area in esame (riquadro rosso in Fig. 6.10) è stata in media di circa 10 mm/anno, con un massimo di 14 mm/anno presso Punta Marina Nord.

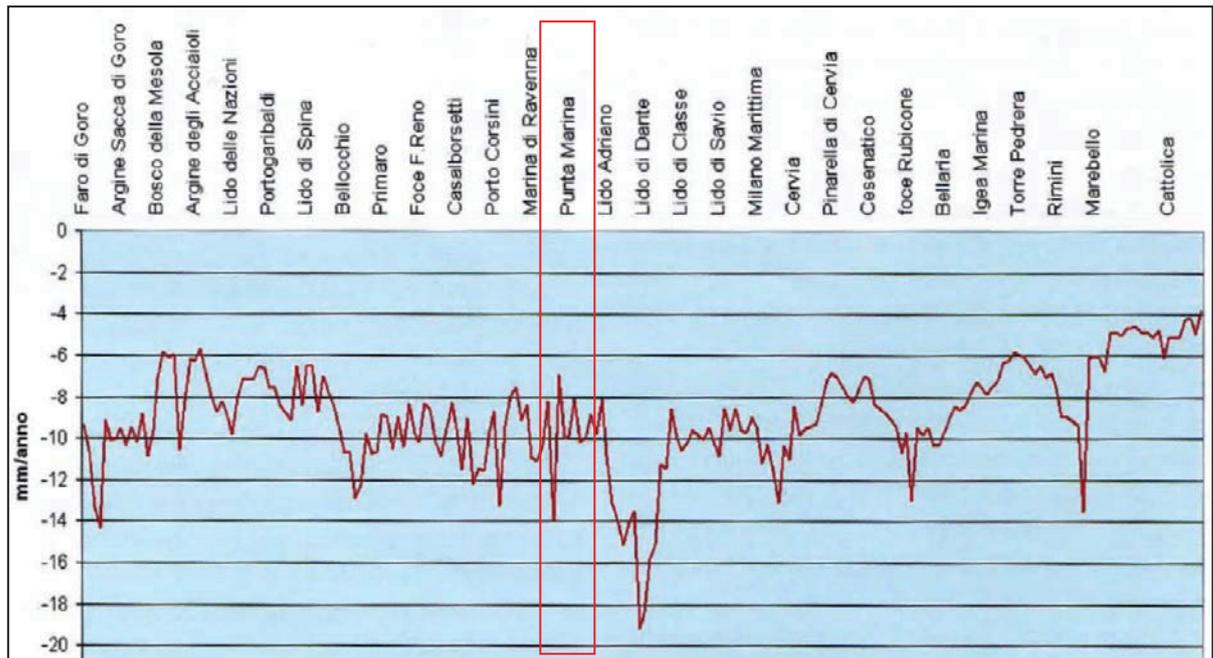


Fig. 6.10 - Velocità di abbassamento nel periodo 1999-2005 (Arpa, 2009).

Dall'analisi condotta da Arpa (2009) si evince la gravità del problema della subsidenza che affligge la costa emiliano-romagnola da più di 50 anni. Per il litorale in esame Arpa ha stimato un abbassamento di circa 47 cm dal 1970 al 2005 e una velocità di abbassamento tra il 2002 e 2006 compresa tra 5-10 mm/anno.

## 6.5 L'apporto solido fluviale

Il litorale regionale è costituito in prevalenza da sedimenti portati al mare dai fiumi e torrenti che qui vi sfociano e, per tale ragione, l'alimentazione delle spiagge è strettamente dipendente dall'entità degli apporti fluviali. La stima della quantità di materiale portato dai fiumi è piuttosto aleatoria. I diversi studi fatti (Idroser, 1981 e 1996; ARPA, 2002 e 2009) hanno messo in luce una notevole diminuzione dei depositi sabbiosi di provenienza fluviale dagli anni '80 agli anni '90. Misure dirette sul trasporto solido, d'altra parte, mettono in evidenza come si sia verificata negli ultimi decenni una diminuzione negli apporti solidi da parte del Po e del Reno (Bondesan & Dal Cin, 1975)

e da parte del Savio e di altri fiumi a sud del Savio (Antoniazzi, 1976), da imputarsi principalmente a presenza di dighe e sbarramenti lungo i corsi d'acqua, sistemazione dei bacini montani, asportazione dagli alvei fluviali di grandi masse di materiali. Questo è un chiaro indice che i fiumi trasportano ancora materiale, specialmente dopo il blocco delle escavazioni in alveo; però tale sedimento non riesce ad arrivare in mare e dunque non fornisce un apporto positivo ai bilanci sedimentari in deficit.

Al fine di valutare quantitativamente l'apporto solido fluviale, l'Autorità di Bacino dei Fiumi Romagnoli, assieme ad ARPA, nel 2007 ha intrapreso una campagna di misura del trasporto solido in 7 sezioni fluviali, di cui 4 in corrispondenza della chiusura dei bacini montani del Lamone, Montone, Ronco e Savio e 3 in corrispondenza della chiusura dei bacini idrografici prima dello sbocco a mare del Lamone, Fiumi Uniti e Savio. Sono state eseguite misure di torbidità per la stima del trasporto in sospensione e installati campionatori per la stima del trasporto al fondo. In entrambi i casi le misure effettuate ed i campioni analizzati hanno rilevato un trasporto di materiale sabbioso molto modesto (Arpa, 2009).

Billi et al. (2007) hanno eseguito nel periodo 2005 - 2006 misure del trasporto al fondo e in sospensione di Fiumi Uniti (Fig. 6.11) ed hanno tentato di coniugare tali misure con la morfodinamica costiera in prossimità della foce. Allo studio emerge che il fiume trasporta una sabbia di dimensioni medie ( $M_z$ : 0,49 mm;  $1 \phi$ ) ed ha un trasporto solido al fondo apprezzabile, in particolare durante le piene, quando le paratie delle chiuse vengono aperte.

Tale affermazione è legata sia alla misurazione di morfologie sul fondo in una zona non influenzata dalla marea, sia dal delta sommerso sui fondali antistanti la foce, alimentato durante le piene. In relazione ai periodi regime normale e alla ridotta portata liquida (a paratie chiuse) si osserva invece la predominanza dei processi marini che tendono ad chiudere la foce.

Ciavola et al. (2010), a partire dalla retta di correlazione ( $R^2=0.74$ ) che mette in relazione le portate liquide del fiume a quelle solide elaborata a partire dalle misure sul campo (Billi et. al., 2007) ha calcolato il trasporto sul fondo degli anni successivi.

In particolare gli autori videro che nel 2008 le paratie rimasero aperte per lungo tempo e in questo periodo vi fu una bassa energia ondosa. Ciò coincise con un

aumento del volume di spiaggia che conferma il reale approvvigionamento di sedimento alla spiaggia da parte dei Fiumi Uniti.

Gli studi di Billi et al. (2007) e di Ciavola et al. (2010) sembrano dunque confutare parzialmente ciò che è stato pubblicato da Arpa (2009), in quanto sembrerebbe che Fiumi Uniti sia ancora in grado di alimentare, anche se in maniera non continua ed in misura contenuta, i litorali limitrofi alla sua foce.

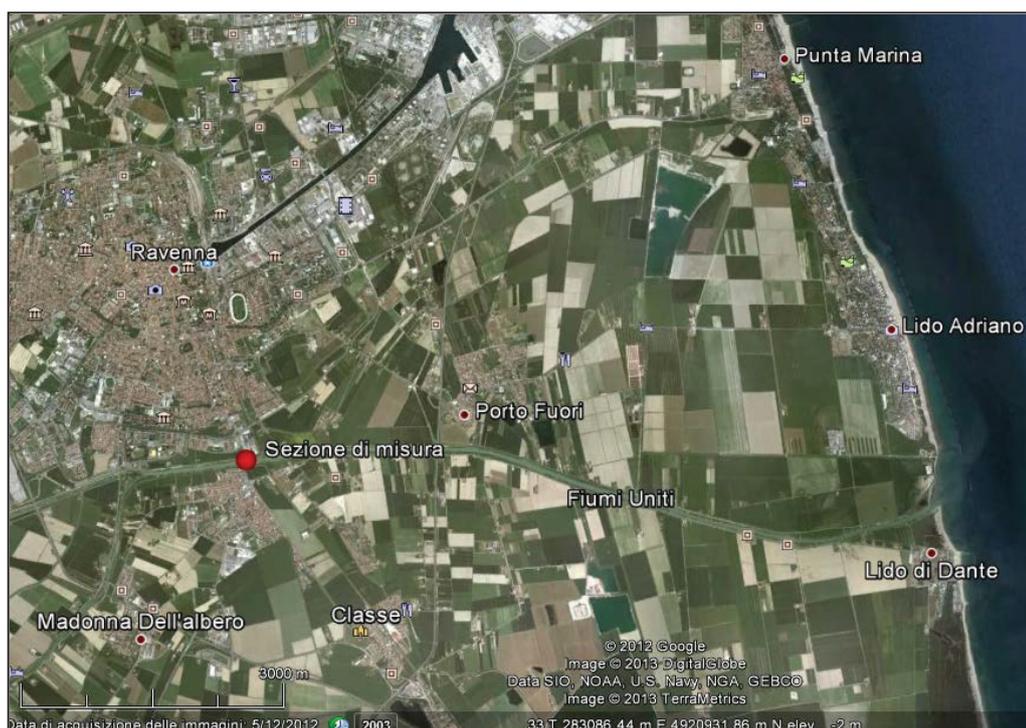


Fig. 6.11 - Ubicazione della sezione di misura utilizzata da Billi et al. (2007) (Fonte: Google Earth).

## 6.6 L'assetto morfologico del litorale in esame

---

Il tratto costiero di Punta Marina ricade all'interno del "tratto costiero significativo n. 45", come definito nello "Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007" (Arpa, 2009) e viene considerato come "spiaggia in equilibrio precario".

Il litorale è caratterizzato da una spiaggia sabbiosa di tipo dissipativo, con la presenza di alcuni apparati dunali residuali, interrotti dalla costruzione degli stabilimenti balneari.

Il tratto sud del litorale è caratterizzato da una continua presenza di opere di difesa per circa 3,7 km, costituite da 11 pennelli collegati ad una barriera semisommersa longitudinale. La barriera sommersa è posizionata a circa 290 m dalla linea di riva, ad una profondità di circa 3 m, ha una quota di sommergenza di circa 0,2 m s.l.m.m. e presenta una berma larga circa 15 m.

A circa 850 m dall'estremo nord di queste strutture è ubicato il cosiddetto pennello "ruvido", costituito da una prima parte emersa, radicata a terra, che si estende in mare per una lunghezza di circa 35 m, e da una parte sommersa per i successivi 100 m.

L'assetto morfologico del tratto costiero è costituito da una spiaggia emersa di ampiezza molto variabile: nel tratto a Nord del pennello "ruvido" è di circa 130-140 m, mentre nel tratto centrale, tra il suddetto pennello e il primo pennello raccordato alle opere foranee costruite a difesa dell'abitato di Punta Marina (Fig. 6.12), la spiaggia si riduce fino a 30-35 m di ampiezza.



Fig. 6.12 – Foto dell'undicesimo pennello del sistema di barriere foranee e pennelli a difesa dell'abitato di Punta Marina, zona meridionale del tratto indagato.



Fig. 6.13 – Foto del frammento dunale confinante con lo stabilimento termale di Punta Marina, ubicato nella zona centrale del tratto indagato.



Fig. 6.14 – Foto dell'apparato dunale nel tratto settentrionale dell'area di studio.

Sono presenti alcuni frammenti dunali di diversa estensione, con una morfologia molto irregolare e quote ridotte: la più alta, nel tratto a Sud si eleva di circa 4 m s.l.m.m., mentre le altre ubicate più a Nord sono intorno 1-2 m di altezza. Esse non sono altro che forme residuali dei vecchi cordoni dunali mappati nell'"Atlante delle Spiagge Italiane" ed oggi confinate tra gli stabilimenti balneari (Fig. 6.13, Fig. 6.14)

La spiaggia emersa ha in media una quota di circa 1,5 m ma la sua pendenza varia da Nord a Sud; nel tratto settentrionale ha una pendenza di circa  $0,4^\circ$  sino alla berma ordinaria, per poi aumentare sino a circa  $3,6^\circ$  nel tratto intertidale e attestarsi attorno a  $1,2^\circ$  nel primo tratto di spiaggia sommersa. Solo nel tratto centrale la pendenza media tra la berma e la linea di riva è di circa  $4,5^\circ$ , per poi scendere sotto il grado nella parte sommersa fino a  $-0,5$  m.

L'assetto morfologico dei fondali evidenzia quanto l'andamento dei fondali sia condizionato dall'assenza o dalla presenza delle opere di protezione costiera. Infatti, nel tratto a settentrione del pennello "ruvido", le isobate si presentano regolari e pressoché parallele tra di loro. Il tratto centrale, invece, è influenzato dal disturbo creato dalle opere poste a meridione. Fino alla profondità di circa  $-1,5$  m l'andamento delle isobate si mantiene pressoché parallelo alla linea di riva, mentre per profondità maggiori le isobate diventano irregolari e si approssimano a costa.

A ridosso della barriera in massi semi-sommersa parallela a costa si riscontra un andamento irregolare del fondale che raggiunge in due punti la profondità di circa  $-6,5$  metri. L'andamento del fondale torna ad essere regolare solo oltre la profondità di  $-4$  m, con una pendenza del tutto confrontabile con quella del settore di costa privo di opere ( $0,3^\circ$ ) (Fig. 6.15).

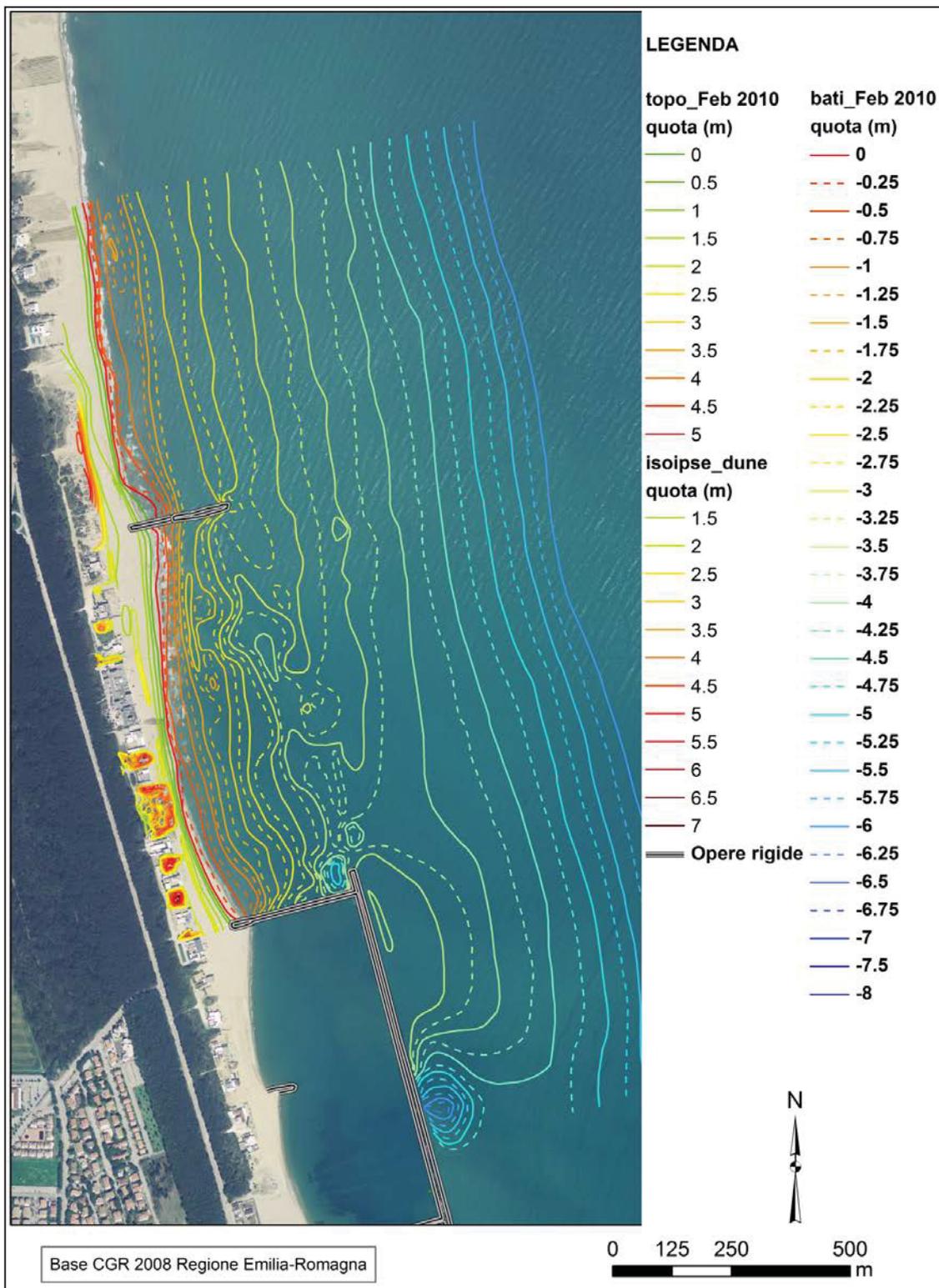


Fig. 6.15 - Carta topo-batimetrica relativa al rilievo eseguito nel Febbraio 2010.

## 6.7 Evoluzione morfologica recente ed interventi di difesa

---

Di seguito viene riportato uno studio di dettaglio dell'evoluzione della linea di riva e delle barre sommerse naturali presso Punta Marina, relazionate alla realizzazione di opere di difesa (rigide-morbide) al fine di avere un quadro completo e dettagliato del sito campione all'anno 2009.

### 6.7.1 Analisi di dettaglio dell'evoluzione della linea di riva

---

Per una più dettagliata analisi della variazione della linea di riva nel tratto oggetto di studio, rispetto allo studio fatto a macro scala nel Cap.4, sono state digitalizzate nuove linee di riva sulle foto aeree relative agli anni 1954, 1968, 1978, 1988, 1997 e 2008. Il computo dello spostamento lineare della linea di riva è stato eseguito lungo 55 transetti con interasse di 50 m, per un tratto costiero di circa 2,8 km (Fig. 6.16).

Dall'analisi dei risultati ottenuti è stato possibile valutare la differente evoluzione dei vari tratti e, quindi, la generale tendenza all'avanzamento o all'arretramento della zona in studio (Fig. 6.17). Analizzando inoltre i tassi di variazione della linea di riva, ossia gli avanzamenti/arretramenti tra due diversi rilievi mediati per l'intervallo di tempo intercorso (Fig. 6.18), è possibile fare alcune considerazioni sui trend principali in atto. Chiaramente tali analisi non può prescindere da uno studio incrociato con l'acquisizione dei vari interventi eseguiti nell'intero paraggio per la protezione della costa e dell'abitato dall'erosione marina. Si osservano differenti comportamenti della linea di riva lungo il litorale in esame, portando alla distinzione di 4 settori (Fig. 6.16):

- tratto A: tratto completamente libero da opere, il cui limite settentrionale è a circa 2 km dalla diga foranea sud di Porto Corsini e si estende verso sud a distanza di 500 m circa dal pennello "ruvido";
- tratto B: tratto libero da opere che si estende da 500 m a Nord del pennello "ruvido" fino all'asse longitudinale di quest'ultimo;
- tratto C: compreso tra il pennello "ruvido" a Nord ed il primo pennello del sistema di opere rigide di Punta Marina a Sud;

- tratto D: tratto protetto da barriere foranee e pennelli.

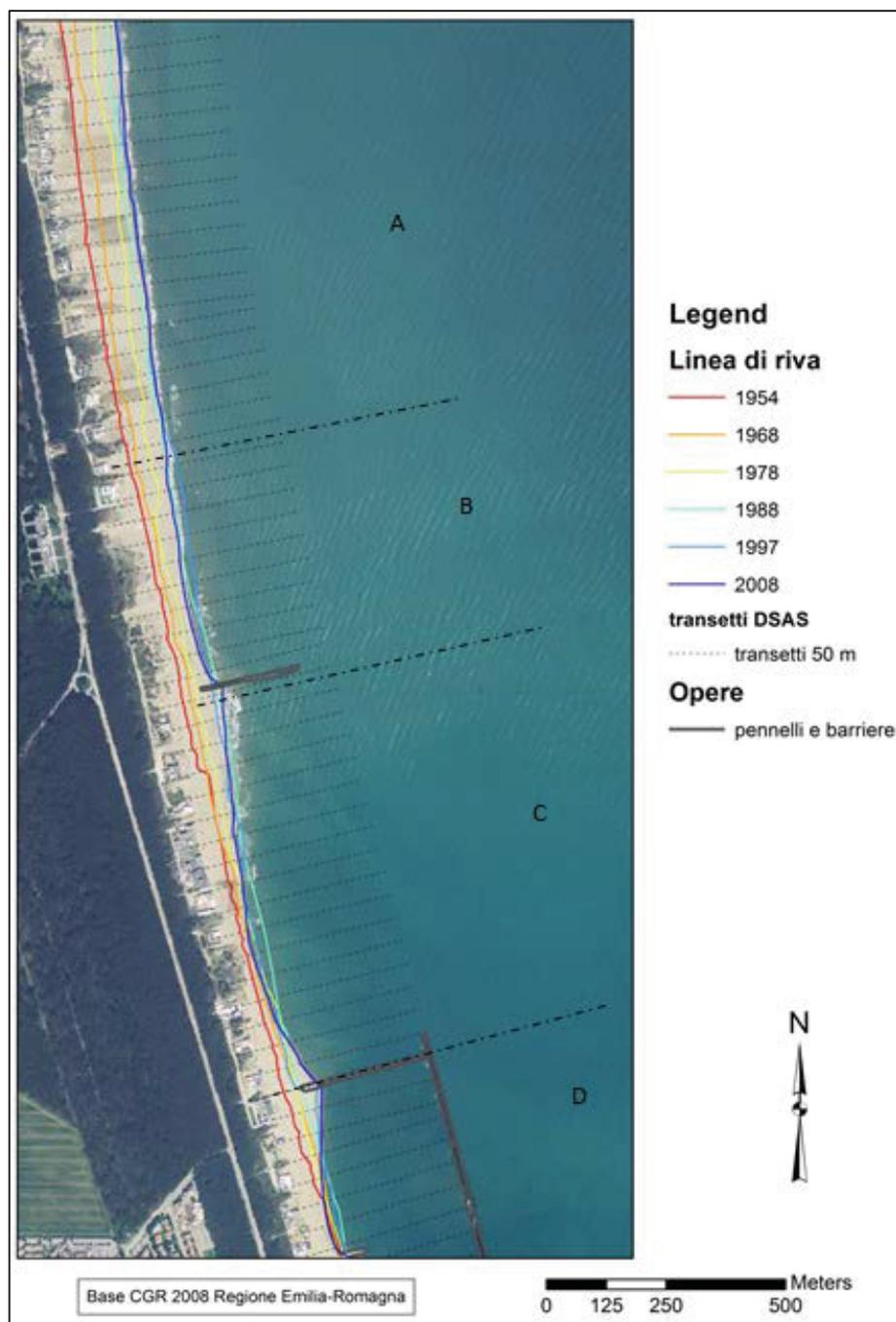


Fig. 6.16 - Distribuzione dei 55 trasetti spazati 50 m, utilizzati mediante DSAS per la valutazione delle variazioni della linea di riva relative agli anni 1954, 1968, 1978, 1988 e 2008.

Per il tratto A (Fig. 6.17, Fig. 6.18), si osserva una spiccata tendenza all'avanzamento della linea di riva fino al 1997 (circa 90 m, quasi 2 m/anno). Dal 1997

questa tendenza si arresta, mantenendosi all'incirca stabile fino al 2008. Ciò potrebbe essere correlato alla realizzazione, nel tratto di litorale più a Sud, di opere rigide, iniziata intorno agli anni 1999-2000 e proseguita fino al 2004, in grado di modificare l'idrodinamica e, quindi, il trasporto dei sedimenti verso Nord.

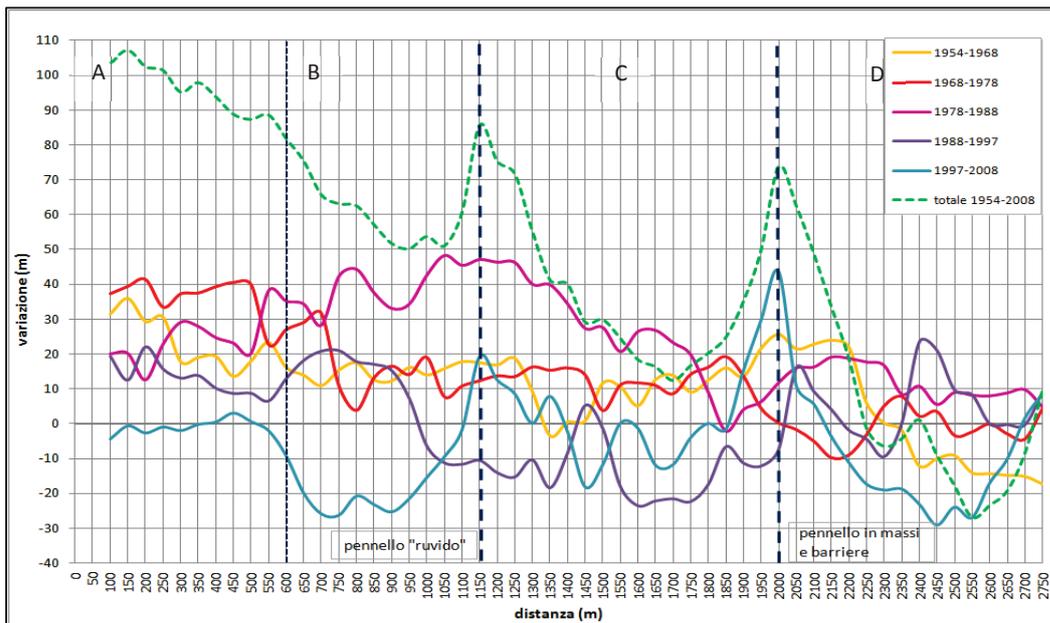


Fig. 6.17 - Variazioni della linea di riva dal 1954 al 2008. Le linee blu tratteggiate indicano la posizione delle opere di difesa.

Per il tratto B, si osserva un avanzamento medio di 70 m fino al 1997; il tasso di avanzamento, di circa 1,5 m/anno dal 1954 al 1978, raggiunge mediamente quasi i 4 m/anno nel decennio '78-'88 per poi tornare ad 1,2 m/anno circa fino al 1997. Dopo tale anno si osserva un cambiamento che determina due comportamenti opposti: il tratto più a nord continua a registrare un avanzamento in media di 2 m/anno, mentre il tratto più a sud registra un tasso di arretramento medio di 1m/anno per il periodo '88 – '97. Anche in questo caso il cambiamento nel comportamento della linea di riva è collegabile alla presenza delle opere di difesa sopracitate. L'ultimo decennio considerato (1997-2008) mostra invece un arretramento importante per gran parte del tratto B (-2 m/anno), fatta eccezione per la zona più prossima al pennello "ruvido". Infatti nel 2006 fu realizzato proprio qui il prolungamento del pennello "ruvido" in grado di creare una zona di accumulo del sedimento trasportato in occorrenza delle

mareggiate provenienti da nord-est; ciò ha determinato un tasso di avanzamento medio di circa 2 m/anno (Fig. 6.18).

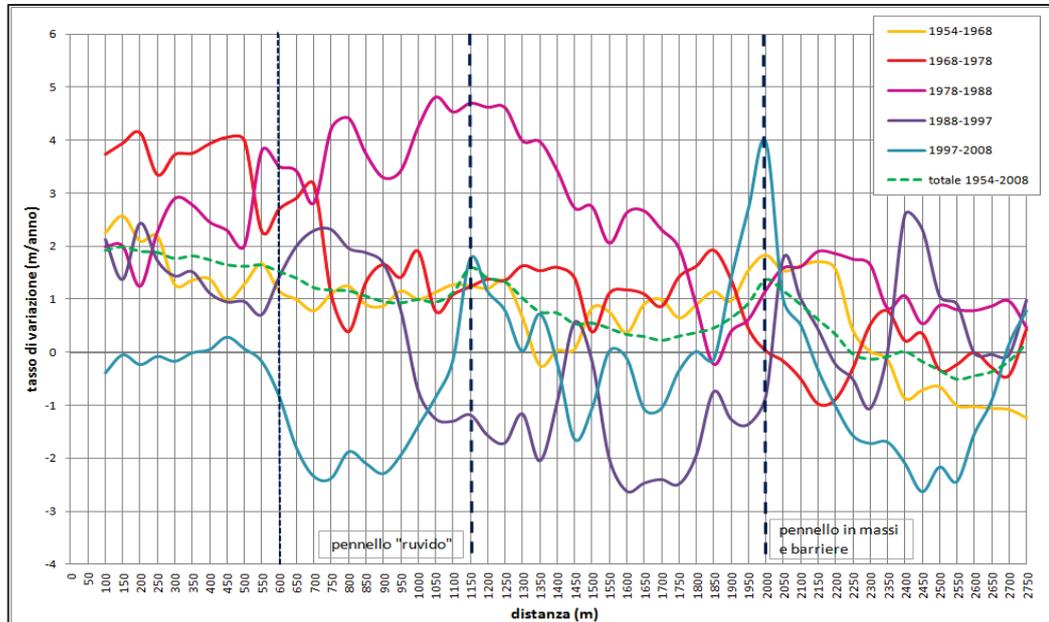


Fig. 6.18 - Tassi di variazione della linea di riva per gli intervalli di tempo considerati. Le linee blu tratteggiate indicano la posizione delle opere di difesa, quali il pennello ruvido (a nord, sinistra) e le barriere longitudinali foranee ed i pennelli ad esse connessi (a sud, destra).

Il tratto C mostra una tendenza all'avanzamento sino al 1988, in media di 70 m nella parte più a nord e di 40 m circa nel tratto più a sud. Anche in questo caso il tasso di avanzamento della linea di riva aumenta nel tempo passando da circa 0,7 m/anno dal 1954 al 1968 ai 2,8 m/anno nel decennio '78-'88. In particolare in quest'ultimo periodo si osserva un comportamento fortemente diverso per la zona prossima al pennello "ruvido" rispetto a quella prossima alla barriera foranea; infatti mentre nella prima in 10 anni la linea di riva avanza in media di 40 m (4 m/anno), nella seconda progradà di soli 10 m considerando un breve tratto in cui è rimasta stabile.

Per tutto il tratto (Fig. 6.17, Fig. 6.18), a partire dal 1988, si innesca un trend erosivo che comporta un arretramento medio della linea di riva di oltre 13 m (-1,5 m/anno) fino al 1997. Tale fatto potrebbe essere connesso alla realizzazione, negli anni 1989-1991, della barriera in sacchi lunga oltre 3,5 km. Tra il 1997 e il 2008 si registra un comportamento non uniforme che vede la zona prossima al pennello "ruvido" in

avanzamento (+1 m/anno), quella centrale in arretramento (-1 m/anno) e quella prossima alle opere rigide nuovamente in avanzamento(+2 m/anno).

La realizzazione della barriera in massi semisommersa e dei pennelli completata nel 2004 ha messo in crisi tutto il tratto subito a nord della stessa, nonostante siano stati realizzati dei ripascimenti artificiali. A ridosso del pennello "ruvido" negli ultimi anni si è verificata una sedimentazione che ha comportato un avanzamento fino a 20 m, dovuto alla posizione sopraflutto rispetto alla corrente lungocosta diretta verso Nord.

Infine, il tratto D mostra un comportamento molto irregolare, con punte in avanzamento ed altre in erosione che si alternano; nel dettaglio si può evidenziare un avanzamento nel tratto più a nord in media di 20 m (+1,8 m/anno) ed un arretramento nel tratto più a sud di circa 12 m per i primi 14 anni analizzati (-1 m/anno, in media). Negli anni successivi si instaura una condizione di stabilità alternata ad un lieve avanzamento della linea di riva, benché si registrino piccoli punti erosivi specialmente nella zona a sud, che si protrae fino al 1997, con tassi erosivi medi inferiori al metro annuo. Dal 1997 al 2008 si instaura invece una condizione erosiva con arretramenti medi di 18 m (-4,9 m/anno); al contrario nella zona più a sud si registra un avanzamento della linea di riva di 10 m circa (+ 1 m/anno). L'alternanza di avanzamenti ed arretramenti è dovuta ai continui interventi di ricalibratura dei pennelli e delle scogliere, ma soprattutto conseguente al completamento di tutta la barriera foranea, della chiusura dei varchi e dei piccoli interventi di ripascimento eseguiti. Chiaramente negli ultimi anni, una volta completate le opere di difesa (2006), tutto il tratto D gode di condizioni di stabilità o di avanzamento.

L'analisi della variazione della linea di riva mette dunque in risalto un comportamento fortemente irregolare e strettamente correlato alla realizzazione delle opere di difesa. Sebbene per l'intero periodo analizzato (1954-2008) si osservi un trend che da erosivo nel tratto più a Sud (20 m di arretramento complessivo), trascurando le anomalie presenti in corrispondenza delle opere, va via via riducendosi fino a trasformarsi in avanzamento, aumentando fino ad oltre 100 m di progradazione della spiaggia procedendo verso il molo di Porto Corsini, tale condizione è soltanto

apparentemente positiva. Lo studio appena descritto mette in luce infatti un trend di forte avanzamento riscontrato nel passato, che a partire dal 1988 è andato però diminuendo fino ad invertirsi. Questa nuova condizione a fatto sì che, nell'ultimo decennio, la realizzazione delle opere di difesa presso Lido Adriano e di fronte l'abitato di Punta Marina ha fortemente ridotto l'apporto solido sull'arenile e messo a rischio le strutture balneari presenti fino a 1,5 km di distanza dal termine delle barriere foranee.

### 6.7.2 Evoluzione delle barre sommerse sui fondali di Punta Marina

Lo studio già affrontato nel capitolo § 4. sulla presenza ed evoluzione delle barre sommerse sui fondali di Punta Marina è stato approfondito, al fine di apportare maggiori conoscenze sulla dinamica evolutiva del paraggio.

Le informazioni ottenute dall'analisi delle sezioni e delle carte batimetriche degli anni '60, '70, '80, '90 e 2000 sono state rappresentate in modo schematico in Fig. 6.19, con l'aggiornamento all'anno 2009.

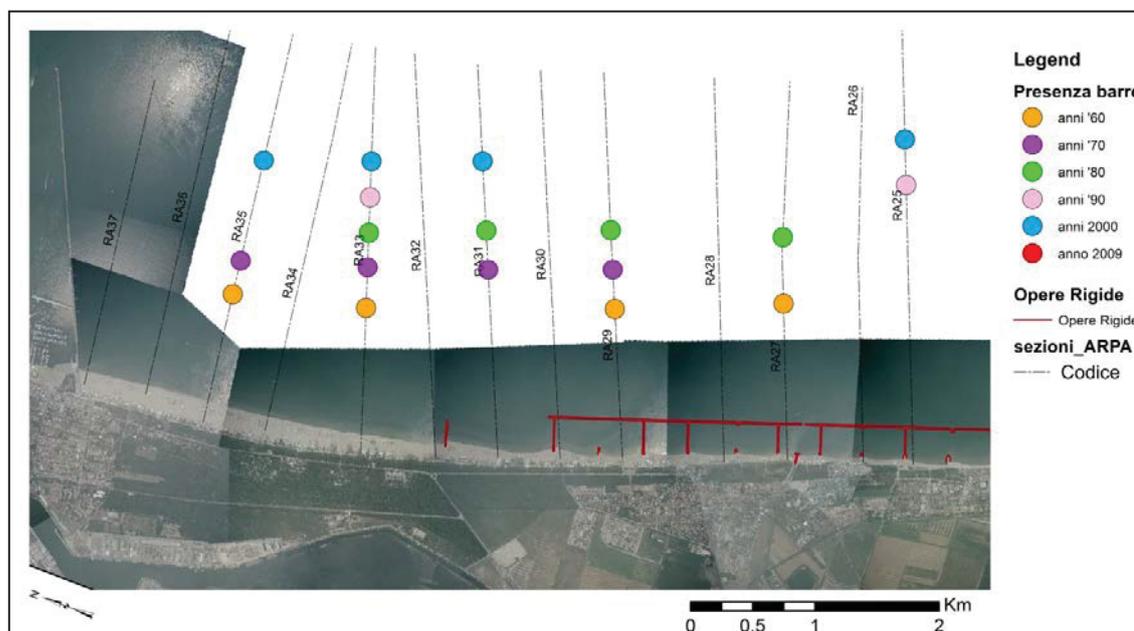


Fig. 6.19 – Presenza delle barre sommerse sui fondali di Punta Marina dagli anni '60 al 2009.

Come si osserva dall'immagine, le sezioni analizzate riportano la presenza delle barre a partire dagli anni '60. In questi anni non erano ancora state realizzate le strutture difensive evidenziate dalle linee rosse. Il litorale era infatti completamente naturale e così lo è stato fino alla fine degli anni '80. Come si può osservare in (Tab. 6.1), le barre hanno raggiunto il loro massimo sviluppo negli anni '70, con altezze medie di 0,8 m tra le sezioni RA29, RA31 e RA33 (Fig. 6.20).

Più a Nord, in corrispondenza di Marina di Ravenna, avevano invece un'altezza inferiore, circa 0,4 m. La profondità delle barre rilevate era in media -2,4 m, a circa 140 m di distanza da costa. Dato interessante è l'ampiezza della loro base, circa 40 m negli anni '60 e oltre i 70 m negli anni '70. Più a meridione, in questo periodo, il litorale di Lido Adriano aveva già iniziato a manifestare problematiche legate all'arretramento della linea di riva. Qui furono installate le prime opere di difesa, costituite da una serie di barriere filtranti trasversali, che però non diedero risultati apprezzabili, per cui, tra il 1978 ed il 1980, furono costruite, a copertura di un tratto di costa di circa 1700 m, un serie di barriere foranee e pennelli trasversali.

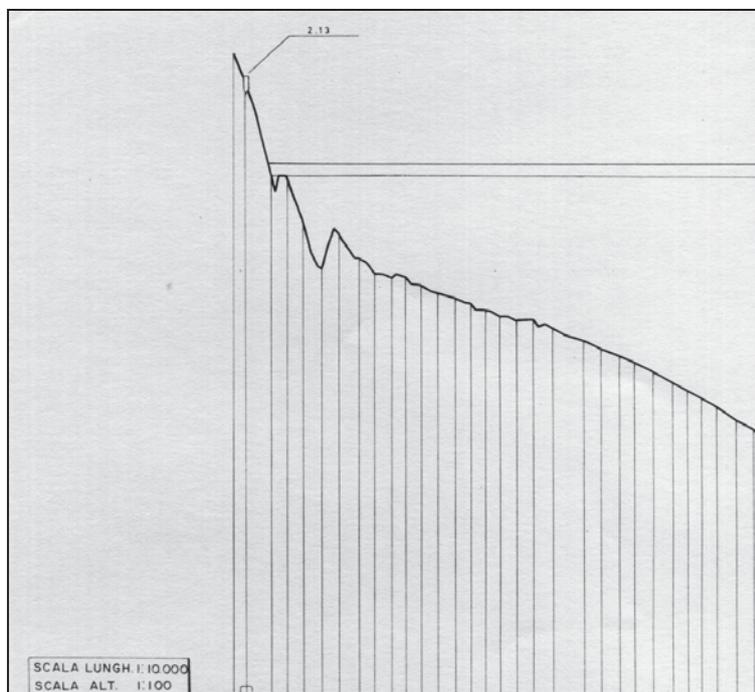


Fig. 6.20 – Sezione tipo relativa al rilievo degli anni '70 (da Ex-Genio Civile OO.MM. di Ravenna).

Tali interventi trasferirono il problema nelle aree sottoflutto, innescando e/o accelerando il processo erosivo delle spiagge di Punta Marina. Per questa zona, infatti, è stato osservato che la linea di costa, rimasta stabile all'incirca sino al 1977, subì poi una forte erosione fino agli anni '80 con tassi massimi registratesi fra il 1977 ed il 1983. Qui infatti, al perdurare della mancanza di apporto solido terrigeno si aggiunse la mancanza di alimentazione fornita dal trasporto solido litoraneo diretto verso Nord (Bondesan et al., 1978).

Le barre a Punta Marina, in questi anni si riducono in altezza (in media 0,5 m) e sono più vicine a costa (95 m di distanza dalla linea di riva, profondità -1,7 m, Tab. 6.1).

La necessità di proteggere gli insediamenti turistici determinò, nel 1989-1990, la scelta di realizzare un primo ripascimento protetto: venne infatti versato del sedimento (900'000 m<sup>3</sup> di sabbia fine proveniente da cava a terra) all'interno di una serie di celle formate da una struttura sommersa in sacchi (barriera longitudinale e trasversali) lunga 4,5 km e intestata a riva su un sistema di corti pennelli in massi (da Lido Adriano, a meridione, fino alla sezione RA32, Fig. 6.19). Gli ultimi due pennelli verso Nord vennero realizzati più lunghi dei precedenti in modo da garantire una maggiore contenimento del trasporto trasversale (Arpa, 2009).

I rilievi degli anni '90 evidenziano nel tratto in esame la scomparsa quasi ovunque delle barre sommerse. Resta una sola sezione, in corrispondenza del tratto non interessato dagli interventi perché ubicato 500 m più a Nord, che riporta la presenza di una barra (RA33). Il rilievo del 2000, probabilmente a causa della rottura dei sacchi riempiti di sabbia, si osserva la comparsa di nuove barre, questa volta di dimensioni ridotte (0,35-0,4 m) e molto vicine a costa (75 m) e a profondità ridotte (-1,4 m) in 3 sezioni (RA31, RA 33, RA35, Fig. 6.19 e Tab. 6.1).

rilievi	RA37		RA35		RA33		RA31		RA29		RA27		RA25	
	Hb	Pb	Hb	Pb	Hb	Pb	Hb	Pb	Hb	Pb	Hb	Pb	Hb	Pb
<b>anni '60</b>			0,30	-1,75	0,40	-1,80			0,40	-1,12	0,40	-0,80		
<b>anni '70</b>			0,40	-1,40	0,90	-2,53	0,80	-2,38	0,80	-2,25				
<b>anni '80</b>					0,50	-1,90	0,35	-1,45	0,60	-2,00	0,40	-1,80		
<b>anni '90</b>					0,50	-2,30							0,50	-2,15
<b>anno 2000</b>			0,35	-1,25	0,40	-1,70	0,35	-1,35					0,60	-2,40

Tab. 6.1 – Riassunto dei parametri di altezza (Hb) e profondità della base (Pb) delle barre rilevate dagli anni '60 al 2000 nel tratto in esame.

A causa della forte subsidenza dell'area (~2cm/anno), dell'asestamento delle barriere, della rottura dei sacchi e della totale assenza di apporti sedimentari, l'erosione si è ripresentata. Venne così progettata una nuova struttura di difesa a celle, questa volta in massi, e costituita da una barriera longitudinale semisommersa, raccordata agli esistenti pennelli per mezzo di trasversali soffolti, anch'essi in massi. I setti trasversali semisommersi avevano la funzione di chiudere il profondo canale che si era formato al lato terra delle opere ed attraverso il quale si spostavano ingenti quantità di materiale (Comune di Ravenna, 2002). La nuova barriera (1999-2000) si estendeva dall'estremo settentrionale delle barriere frangiflutti di Lido Adriano fino all'altezza della piazza centrale dell'abitato di Punta Marina (cioè fino al terzo pennello a Nord della foce del canale Molino, tra le sezioni RA28 e RA 29, Fig. 6.19).

Per contrastare i fenomeni erosivi previsti nell'area di sottoflutto venne inoltre previsto un nuovo pennello, da realizzare nel tratto compreso tra Punta Marina e Marina di Ravenna, all'altezza del bagno Ruvido, per tale ragione denominato pennello "ruvido", realizzato in parte emerso e in parte sommerso. Alla realizzazione della nuova difesa a celle veniva accompagnato un ripascimento di circa 125.000 m<sup>3</sup> che fu esteso fino all'ultima cella, tra le sezioni RA28 e RA 29.

La barriera sommersa venne poi prolungata (2001) fino al quarto pennello a Nord della foce del canale Molino (sezione RA29). Successivamente alle opere rigide venne realizzato anche un ripascimento all'interno della nuova cella per circa 25.000 m<sup>3</sup>. Nel 2001, nell'ambito della manutenzione delle opere di difesa, venne progettato il ripascimento conservativo della spiaggia a Nord della difesa attuale, stimando una necessità, nel breve-medio termine, di circa 100.000 m<sup>3</sup> di ripascimento di cui, in base ai finanziamenti disponibili, ne furono collocati circa il 40% nel 2002 e il restante 60% nel 2003, tutti comunque all'esterno del tratto difeso dalla barriera soffolta.

Nel 2003 vennero ancora eseguiti due interventi di ripascimento all'interno del tratto protetto dalla barriera frangiflutti, circa 10.000 m<sup>3</sup> prima e circa 18.000 m<sup>3</sup> di sabbia poi. Nel 2004 è stato realizzato il prolungamento di 700 m verso Nord della barriera semisommersa ed è stato ricalibrato il tratto di barriera costruita negli anni precedenti in gran parte collassata, mentre nel 2006 viene prolungato il pennello

“ruvido” verso mare e completata la barriera foranea raggiungendo la configurazione rilevata all'anno 2009.

Secondo quanto comunicato dal Comune di Ravenna, il tratto esaminato è stato soggetto a ripascimenti pressoché ogni anno e di entità variabile: 2004 (1.000 m<sup>3</sup>), 2005 (37.000 m<sup>3</sup>), 2006 (12.000 m<sup>3</sup>), 2007 (6.500 m<sup>3</sup>), 2008 (20.000 m<sup>3</sup>), 2009 (18.300 m<sup>3</sup>). In particolare, nel 2007, all'interno del progetto di ripascimento di 7 spiagge con sabbie da accumuli sottomarini (ARPA, 2009), la Regione Emilia-Romagna ha apportato nel tratto di interesse (meno di 2 km di lunghezza) circa 190.000 m<sup>3</sup> di sabbia).

Un ulteriore intervento fu la chiusura di alcuni varchi presenti tra le barriere semisommerse per ostacolare la perdita di sedimento verso il largo. Infatti, durante le mareggiate si viene a creare un surplus di acqua all'interno delle barriere che defluisce in rip current dirette verso il largo capaci di prendere in carico e disperdere notevoli quantitativi di sedimento. Ad oggi vi sono solo 4 varchi, 3 dei quali protetti da un breve tratto di scogliera lato terra. Si è così delineata una serie di celle chiuse, che hanno causato un forte peggioramento della qualità paesaggistica ed ambientale, nonché di sicurezza alla balneazione.

A seguito di questi innumerevoli interventi di difesa costiera, il rilievo eseguito nel 2009 ha evidenziato la totale assenza di barre sommerse.

Andando ad analizzare i parametri caratterizzanti le barre rilevate nei vari anni a disposizione, si osserva che, per quanto riguarda l'andamento del rapporto tra l'altezza e la larghezza della barra ( $H_b/L_b$ ), vi sia stato un incremento dagli anni '60 agli anni '90, passando da un valore medio di 0,009 a 0,020, per poi abbassarsi al valore minimo nel 2000, di 0,008 (Fig. 6.21).

Questo suggerisce dunque un trend di aumento dell'altezza della barra rispetto alla larghezza della base fino agli anni '90; la barra poi tende ad appiattirsi ed ad allargarsi nel rilievo del 2000.

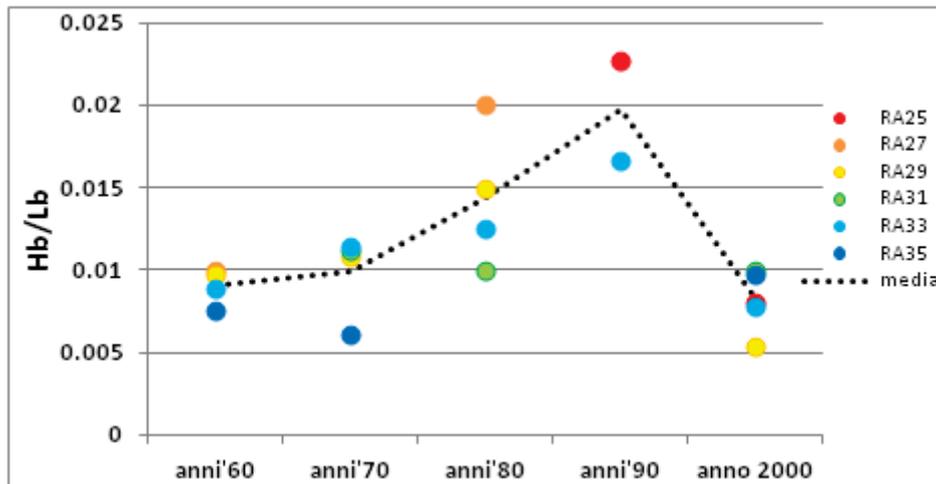


Fig. 6.21 – Grafico della variazione del rapporto altezza/larghezza della base delle barre dagli anni '60 al 2000. I colori rappresentano la sezione di riferimento del dato.

Analizzando invece il rapporto tra la profondità della base e la distanza da costa della cresta delle barre (Pb/Dc) si osserva che anche in questo caso vi è un incremento dei valori dagli anni '60 agli anni '90, passando da una media di 0,016 a 0,024. Nel 2000 invece, il trend si inverte e si osserva un rapporto medio Pb/Dc di 0,019 (Fig. 6.22).

Questa tendenza dunque suggerisce un aumento della profondità della base delle barre rispetto alla loro distanza da costa. La profondità registrata mostra un valore minimo negli anni '60 (in media -1,4 m) che aumenta fino a -2,2 m negli anni '90 e si attesta attorno a -1,9 nel 2000; la distanza da costa, invece, registra un valore minimo nel rilievo degli anni '60 (tra 45 e 135 m, da Sud verso Nord), ed un massimo negli anni '70 (tra 130 e 150 m); successivamente dagli anni '80 al 2000 varia tra i 70 ed i 110 m.

Pertanto, sembrerebbe che le barre, pur mantenendosi mediamente ad una distanza tra i 90 ed i 130 m dalla linea di riva, abbiano aumentato la loro profondità fino agli anni '90, che poi diminuisce nel 2000. Questo risultato porterebbe a pensare che la pendenza dei fondali nella zona di surf sia andata ad aumentare negli anni. Osservando dunque la variazione della pendenza del fondale dalla linea di riva alla batimetrica dei 6 m, per il tratto compreso tra le sezioni RA25 – RA37 (Fig. 6.19), emerge che vi è stato un abbassamento progressivo fino agli anni '90, passando da circa 0,33° di pendenza a circa 0,40°. Tale valore sembra essere lievemente diminuito nel 2000, per poi tornare però allo stesso valore nel 2009 (Fig. 6.23).

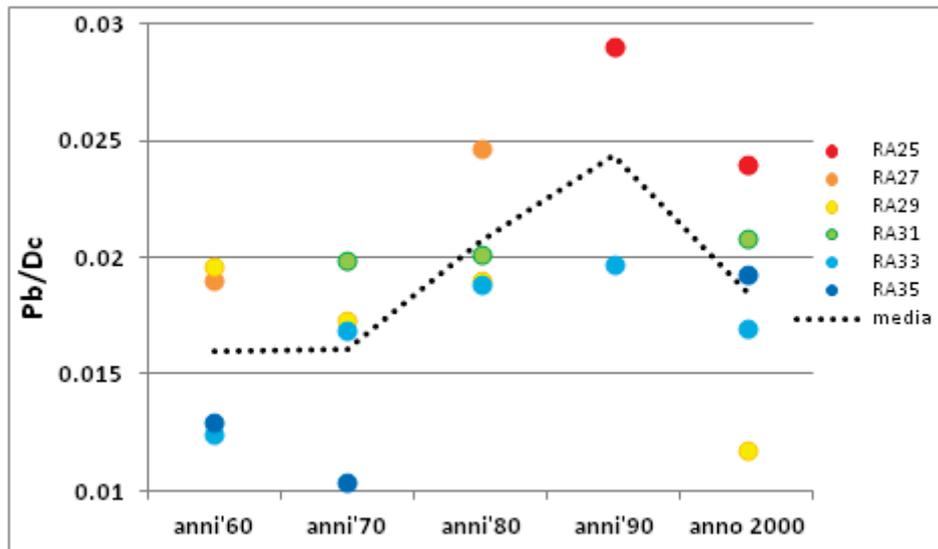


Fig. 6.22 - Grafico della variazione del rapporto profondità della base e distanza da costa della cresta delle barre dagli anni '60 al 2000. I colori rappresentano la sezione di riferimento del dato.

Tali dati trovano riscontro in quelli di ARPA (2000), per la batimetria dei 5 m. Ma se si osserva la variazione della batimetria degli 8 m, si osservano trend opposti tra Marina di Ravenna, ubicata a settentrione di Punta Marina, e Foce Fiumi Uniti, a meridione. La -8 m infatti prograda verso il largo di circa 200 m in 32 anni procedendo verso il molo di Porto Corsini (a Nord), a causa dell'intercettazione dei sedimenti trasportati verso Nord dalla corrente lungocosta, mentre arretra di 600 m in prossimità della foce di Fiumi Uniti (Tab. 6.2).



Fig. 6.23 – Variazione della pendenza dei fondali tra la linea di riva e la profondità di 6 m.

Pertanto a Punta Marina si ipotizza una situazione intermedia, e l'abbassamento dei fondali anche oltre la zona di surf potrebbe spiegare il motivo per il quale sono state riscontrate barre a maggiori profondità fino agli anni '90, pur mantenendosi mediamente ad una distanza tra i 90 ed i 130 m dalla linea di riva.

sezioni	variazione distanza (m)		variazione pendenza (°)	
	-5	-8	-5	-8
Marina di Ravenna	-200	200	0.09	-0.02
Foce Fiumi Uniti	-500	-600	0.29	0.13

Tab. 6.2 – Variazione della distanza dalla linea di riva in metri delle batimetriche dei 5 m e degli 8 m dal 1968 al 2000 (da ARPA, 2000).

## 6.8 L'intervento innovativo eseguito nella primavera del 2010

A causa del progredire della subsidenza e di una serie di fenomeni meteo marini con prevalente provenienza da Nord-Est, che hanno accentuato l'erosione costiera, in ragione della conformazione delle opere di difesa rigide, progettate per una protezione prevalente da fenomeni da Sud-Est, la tendenza all'erosione della spiaggia è aumentata, portando alla formazione di hot spots erosivi e ingressioni marine particolarmente disastrose durante la stagione invernale, in corrispondenza della spiaggia libera fino al pennello "ruvido" ( Fig. 6.24), nonostante i ripetuti ripascimenti a cadenza annuale, progettati con il fine di garantire un'ampiezza di spiaggia minima per lo svolgersi delle attività turistico-ricreative.

Per tentare di mitigare tale fenomeno erosivo , a Punta Marina è stato eseguito un intervento sperimentale nella primavera del 2010:

- un ripascimento della spiaggia emersa nel tratto centrale, tra i due pennelli;
- un ripascimento sommerso nel tratto centrale;
- la messa in opera di un *reef* artificiale (*Tecnoreef*);
- un ripascimento per realizzare una base di appoggio del *reef*.



Fig. 6.24 - Ubicazione degli interventi a difesa della spiaggia di Punta Marina eseguiti nel 2010.

### **Ripascimento della spiaggia emersa**

Il ripascimento della spiaggia ha previsto il versamento di un volume di circa 19.000 m<sup>3</sup> di sabbia fine (Mz= 2 φ) per una lunghezza di circa 800 m, tra il pennello “ruvido” a Nord e il sistema di difesa rigida a celle a Sud (Fig. 6.25), con materiale proveniente

dalla spiaggia di Porto Corsini (RA), leggermente più sottile di quello nativo ( $Mz= 1,9 \phi$  in battigia).



Fig. 6.25 – Foto della fase di realizzazione del ripascimento della spiaggia emersa.

### **Barriera in “reef” artificiali: Tecnoreef**

Il reef artificiale, lungo circa 350 m a partire dalla testata delle barriere foranee, è composto da n. 44 elementi di forma piramidale disposti lungo un asse che tende a chiudere leggermente in direzione della parte terminale a mare del pennello del “Ruvido”; è stato posizionato con una quota di sommergenza di -1 m.

La realizzazione della barriera prevede l’inserimento di moduli mediante l’utilizzo di piastre ottagonali in calcestruzzo armato che possono essere assemblate a formare strutture stabili di reef artificiali. La configurazione scelta è di tipo piramidale (Fig. 6.26).

La particolare geometria di queste piastre è stata ideata al fine di non bloccare l’onda in arrivo bensì di assorbirla e smorzarla. Infatti la struttura permette all’onda di entrare all’interno delle stesse dove, generando diverse turbolenze, ne esce sensibilmente indebolita. Questo produce principalmente due effetti: l’onda viene

scomposta in più direzioni e perciò la sua energia viene parzialmente assorbita; inoltre le piccole turbolenze createsi inducono la deposizione sul fondo dei sedimenti fini trasportati. Queste strutture sono, inoltre, progettate in modo da resistere alle spinte delle correnti o agli effetti di trascinamento delle reti e da evitare l'affondamento della struttura nel fondale e la loro versatilità consente di calibrare la giusta protezione del fondale a seconda del tipo di costa e della forza del mare nello specifico sito di intervento.

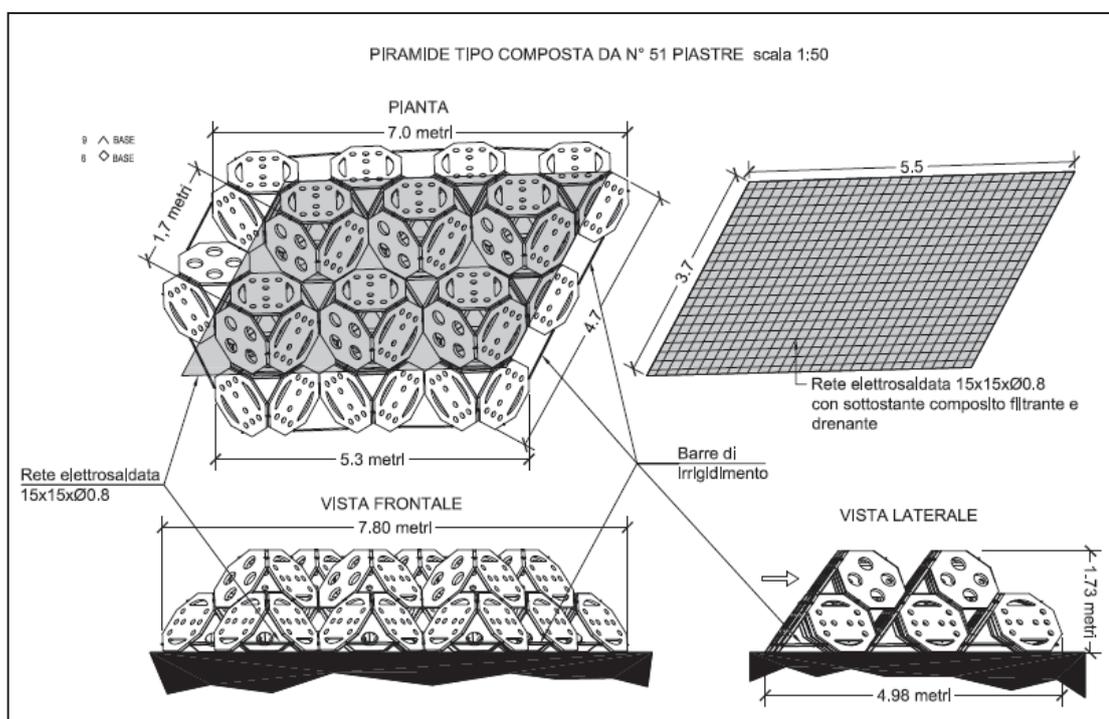


Fig. 6.26 - Barriera Tecnoreef, composta da moduli a forma piramidale, realizzata assemblando piastre in calcestruzzo del diametro di 117 cm e spessore 9 cm.

### **Ripascimento sommerso**

Il versamento è stato realizzato parallelamente alla linea di riva ed in continuità con il reef artificiale fino alla testata sommersa del pennello "ruvido", attraverso il pompaggio in un sabbiodotto di una miscela di sabbia fine ed acqua da terra, con un'elevazione dal fondale di circa 1,5 m, un'ampiezza della cresta di circa 50 m ed un angolo di pendenza delle scarpate laterali di circa 30°. Tale ripascimento è stato realizzato dove in natura era parzialmente presenti le barre sommerse, di cui oggi si

osserva una lieve ondulazione del fondale. Infatti, dall'analisi di alcuni profili perpendicolari alla costa relativi al rilievo del Febbraio 2010, è risultato che a circa 250 m dalla linea di riva, ad una profondità di circa 2,7 m, si ha un innalzamento del fondale di circa 0,2 m per una larghezza di circa 40 m (Fig. 6.27, Fig. 6.24).

Inoltre la sua posizione si raccorda con l'asse della barriera di reef artificiali e quindi con la barriera semi-sommersa di Punta Marina, creando così una continuità con la barriera in massi.

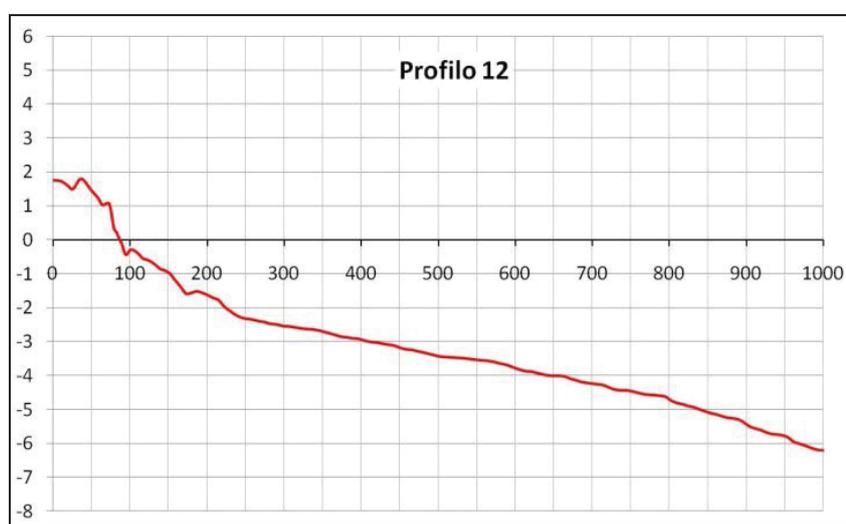
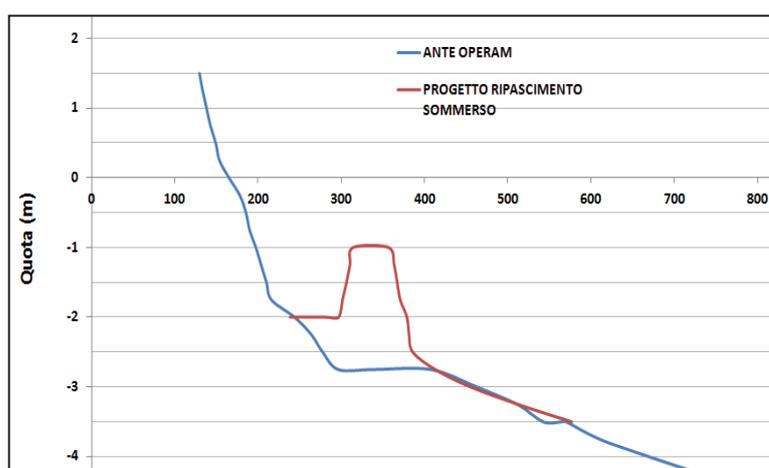


Fig. 6.27 - Profilo tipo dei fondali nella zona di realizzazione del ripascimento sommerso.



Ripascimento Sommerso	
<b>Profondità</b>	-2,7 m
<b>Lunghezza</b>	500 m
<b>Altezza</b>	1,5 – 1,7 m
<b>Ampiezza cresta</b>	50 m

Fig. 6.28 - Profilo tipo dei fondali pre- intervento e disegno progettuale del ripascimento sommerso.

I sedimenti utilizzati per la realizzazione del ripascimento sommerso sono stati ottenuti dal prelievo di materiale di risulta da interventi di livellazione dei terreni agricoli, accumuli eolici sepolti. Dal confronto dei parametri tessiturali emerge che il diametro medio dei sedimenti di cava (2,2  $\phi$ ) è più grossolano di quello dei sedimenti nativi alla profondità di 2,7 m (3,2  $\phi$ ), ma più fine dei sedimenti della spiaggia emersa (1,9 $\phi$ ) (Tab. 6.3).

L'analisi delle caratteristiche tessiturali dei sedimenti di prestito e nativi permette una verifica della compatibilità sedimentaria tra i due materiali e quindi una stima della stabilità del sedimento versato. Confrontando i valori medi del diametro medio dei due tipi di sedimento, è stata determinata la compatibilità sedimentaria attraverso la metodologia proposta da Krumbein (1957), Krumbein and James (1965), James (1974, 1975). Tale metodo utilizza la distribuzione della granulometria del sedimento nativo e di quello di prestito, calcolando un parametro (*Overfill Factor*,  $R_A$ ) relativo alla quantità di materiale richiesto per il versamento in funzione della differenza tra le caratteristiche tessiturali tra i due sedimenti. Si presuppone che il materiale di prestito versato dovrà subire una selezione ad opera dei processi costieri. Chiaramente, la porzione di materiale versato molto differente dal sedimento nativo verrà dispersa al largo. James (1975) calcolò dunque un fattore di *overfill* ( $R_A$ ) ed un fattore di ripascimento ( $R_I$ ), definendo il primo come il volume di materiale richiesto per produrre un'unità stabile di materiale versato ed il secondo come l'efficacia del ripascimento, utile per una stima della periodicità con cui deve essere aggiunto materiale per mantenere la spiaggia in condizioni di equilibrio. Il valore del fattore di riempimento ( $R_A$ ) per i sedimenti alla profondità dei 2,7 m è  $< 1$  (quadrante 2, Fig. 6.29), pertanto il materiale versato risulta estremamente stabile.

<b>Caratteristiche sedimentologiche</b>				
	<b>Sabbia (%)</b>	<b>Fango (%)</b>	<b>Mz (<math>\phi</math>)</b>	<b><math>\sigma</math> (<math>\phi</math>)</b>
<b>Mat. Prestito</b>	94,7	5,3	2,2	0,6
<b>Mat. Nativo (-2,7 m)</b>	96,3	3,7	3,2	0,3
<b>Mat. Nativo (spiaggia)</b>	99,1	0,9	1,9	0,4

Tab. 6.3 - Caratteristiche granulometriche dei campioni del materiale di prestito e del sedimento nativo.

Secondo la regola della compatibilità sedimentaria, il materiale di prestito che risulta più grossolano del materiale nativo produce una spiaggia tanto stabile quanto una spiaggia ripasciuta con materiale simile a quello nativo. Per quanto riguarda il volume richiesto è necessario un volume minore di materiale più grossolano, se paragonato al volume di materiale necessario avente caratteristiche dell'area nativa. Analizzando la classazione del materiale di prestito (mediamente pari a 0,6), si nota che tale sedimento è più classato rispetto ai sedimenti alla profondità di 2,7 m e in battigia, che mostrano rispettivamente un valore medio di 0,3 e 0,4.

La stima della durata teorica del ripascimento, attraverso la determinazione del fattore di ripascimento  $R_j$ , nel caso del ripascimento sommerso risulta nel campo "stabile", mentre nell'ipotetico caso della battigia risulta all'incirca sull'isolina 1, pertanto anche qui il materiale risulta grossomodo stabile. Infatti, per valori di  $R_j$  maggiori di "1", il materiale di prestito si eroderà più velocemente di quello nativo. Al contrario, valori minori di "1" indicano maggiore stabilità del materiale di prestito rispetto a quello nativo.

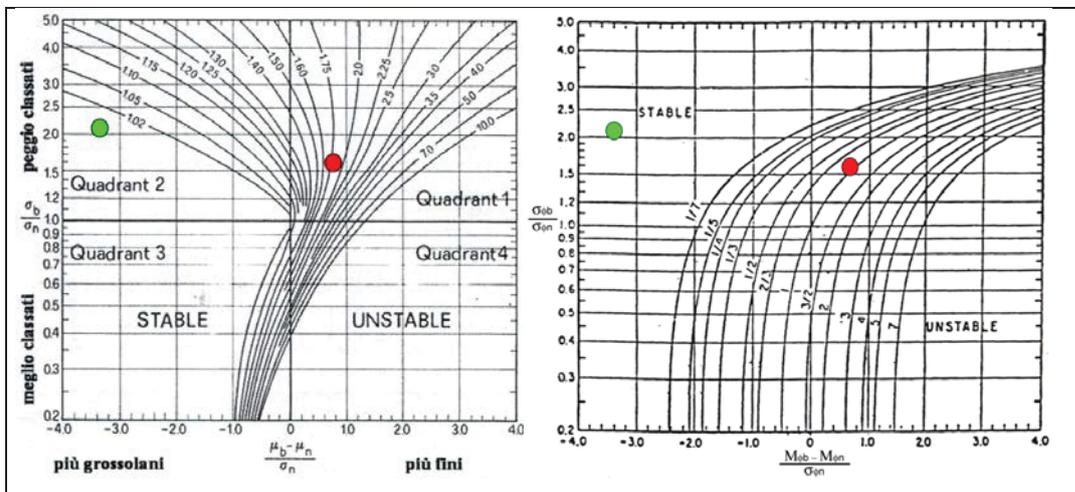


Fig. 6.29 – Grafico a sinistra: fattore di riempimento  $R_A$  (Hobson, 1977); grafico a destra: fattore di ripascimento  $R_j$  (James, 1975). In entrambi: cerchio con colore verde=  $R_A$  e  $R_j$  per sedimenti alla batimetrica dei 2,7m; cerchio con colore rosso=  $R_A$  e  $R_j$  per sedimenti di battigia.

## 6.8.1 Considerazioni sul clima marino durante la realizzazione dell'intervento

Al fine di poter analizzare l'intera situazione nella sua complessità, è importante considerare le modalità di esecuzione dell'intervento nonché le condizioni meteo-marine al contorno. Le condizioni meteo, spesso sfavorevoli ai lavori di versamento, hanno infatti giocato un ruolo importante, obbligando i lavori a diverse interruzioni.

Le altezze d'onda maggiori si sono verificate con settore di provenienza NE (45%) mentre la maggior parte degli stati di mare proveniva da ESE – SE (47%). Le calme ( $H_s < 0,25$  m) sono state il 39 % del totale dei dati (Fig. 6.30).

Come riassunto in Tab. 6.4, durante la realizzazione dell'intervento tra Febbraio e Maggio 2010, si sono verificate 7 mareggiate, tutte con direzione di provenienza tra  $35^\circ\text{N}$  ed  $83^\circ\text{N}$ . Si osserva che 4 mareggiate hanno registrato valori di  $H_{\text{max}}$  superiore ai 2 m e tra questi uno con  $H_{\text{max}}$  di quasi 4 m. Quest'ultimo evento è stato anche il più energetico (cat.3; vedi cap.§ 7.4).

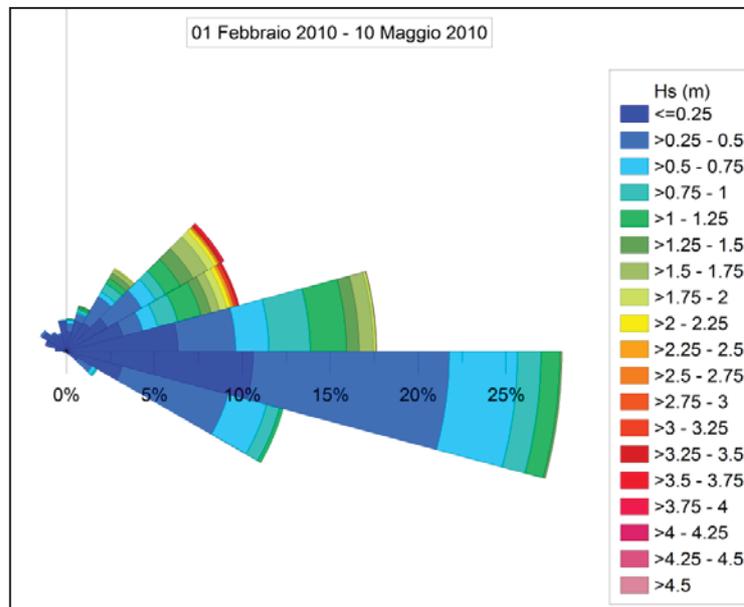


Fig. 6.30 - Rosa delle onde registrate dalla boa "Nausicaa" (Regione Emilia-Romagna) nel periodo Febbraio-Maggio 2010 e trasposte al largo di Punta Marina.

Considerando le principali mareggiate riscontrate durante le operazioni di sversamento della sabbia e le caratteristiche ondametriche comunque sempre piuttosto energetiche anche se non classificabili come mareggiate, si è determinata un'importante dispersione del materiale, in particolare di quello più fine, che ha comportato la sospensione e ripresa dei lavori più volte ripetuta. Di tali perdite non è stato possibile effettuare un computo accurato.

	DATA		durata (h)	Direz. (N°)	Hs med (m)	Hs max (m)	Tp (s)	E (m <sup>2</sup> hr)	cat.
	inizio	fine							
1	6/2/10 22.30	7/2/10 6.00	8	35	1,51	1,73	6,02	17,3	1
2	10/2/10 12.30	10/2/10 22.30	9,5	77	1,52	1,63	6,94	23	1
3	19/2/10 15.00	19/2/10 21.30	7	83	1,63	1,84	8,74	18,7	1
4	3/3/10 21.00	4/3/10 16.30	19,5	72	1,84	2,27	6,36	67,6	2
5	5/3/10 9.30	5/3/10 16.00	7	66	1,77	2,02	6,67	22,2	1
6	7/3/10 12.30	8/3/10 13.00	25	57	1,7	2,09	6,65	72,8	2
7	8/3/10 22.30	10/3/10 21.00	45,5	57	2,34	3,79	7,43	269,8	3

Tab. 6.4 - Eventi di mareggiata individuate nel periodo Febbraio - Maggio 2010.

## 7 Materiali e metodi

---

Con l'obiettivo di monitorare l'evoluzione e la *performance* dell'intervento di ripascimento sommerso e della messa in opera del *reef* artificiale presso il litorale di Punta Marina, sono stati effettuati, oltre al rilievo precedente ai lavori, 8 rilievi della spiaggia e dei fondali a partire dal mese di Dicembre 2010 fino al mese di Ottobre 2012 (con cadenza stagionale).

Inoltre, sono stati eseguiti 2 rilievi batimetrici con ecoscandaglio multi-beam nei mesi di Maggio 2011 e Maggio 2012 dell'area di intervento, utili ad avere una ricostruzione tridimensionale dettagliata di strutture molto piccole come quelle dei moduli che compongono il *reef* artificiale.

Sono stati effettuati inoltre 3 campionamenti sedimentologici, due dell'intera area di studio (Dicembre 2010 e Ottobre 2012) e uno intermedio eseguito nella sola area di intervento (Maggio 2011), in concomitanza con le campagne topo-batimetriche svolte nello stesso periodo.

Per l'intero periodo di studio sono stati raccolti dati ondametrici, al fine di poter effettuare delle correlazioni con i risultati ottenuti dai rilievi di campagna.

### 7.1 Rilievi topografici e batimetrici

---

I rilievi topografici della spiaggia emersa sono stati condotti lungo dei profili perpendicolari alla linea di riva estesi dalla duna, se presente, alla batimetrica di -0,5 m (Fig. 7.1). Al fine di una corretta rappresentazione delle morfologie, si è proceduto al rilevamento dei punti di rottura delle pendenze. Per poter mantenere una continuità con i lavori precedenti, per quanto possibile, sono stati ripetuti i profili già tracciati e depositati presso il Comune di Ravenna. Oltre ai profili, è stata rilevata la posizione planimetrica della linea di riva tramite l'acquisizione di punti ogni 20 m circa.

Tutte le operazioni di posizionamento e misura del terreno sono eseguite con il sistema GPS (*Global Positioning System*) differenziale in modalità RTK (*Real Time Kinematics*). Questo sistema consta di due ricevitori GPS in doppia frequenza (L1/L2) ed in comunicazione fra loro tramite la rete GSM per ridurre al minimo l'errore del posizionamento GPS tradizionale. Il ricevitore, definito base, viene posizionato su di un punto noto (caposaldo). Tale caposaldo è stato materializzato sul tetto di uno stabilimento balneare (Bagno 22 – Federico, Tab. 7.1) all'interno dell'area di studio, a partire da un vertice IGM di cui si disponeva della monografia.

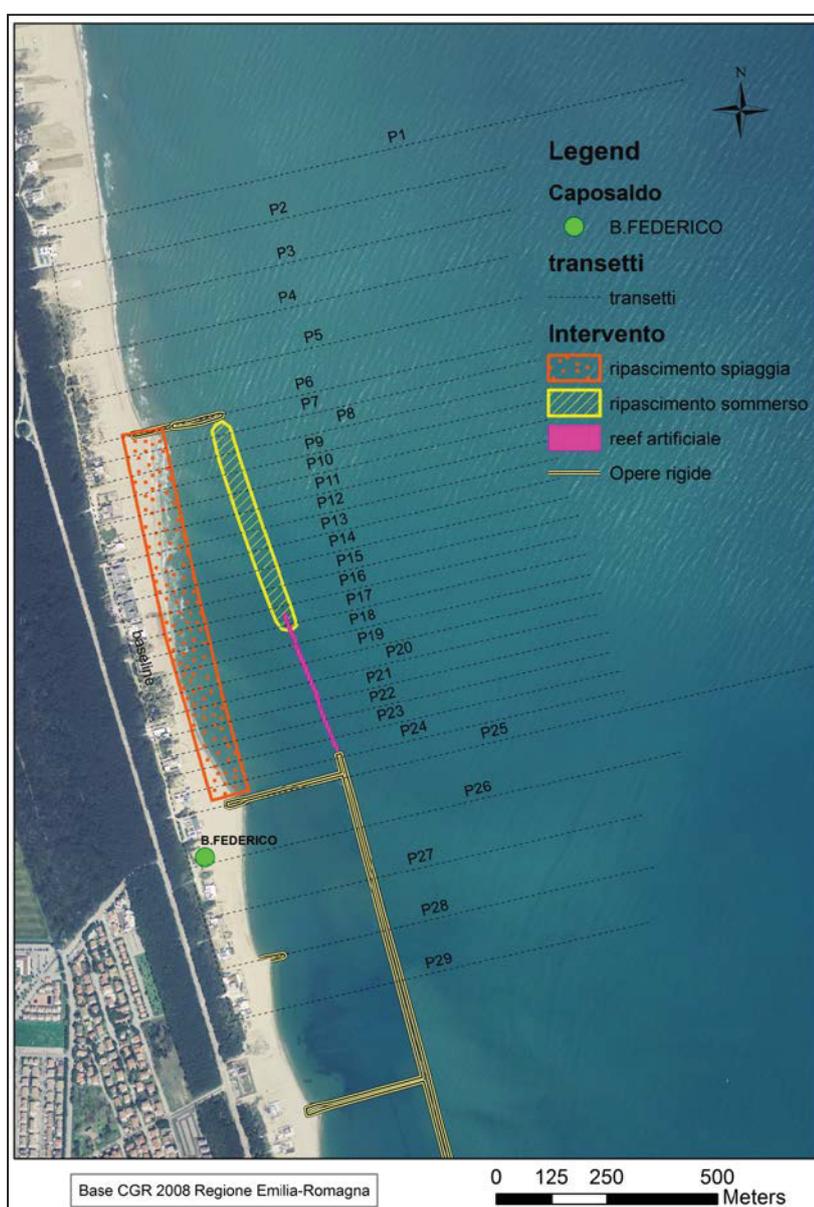


Fig. 7.1 - Area di indagine con traccia dei profili.

Calibrata la ricezione, lo strumento è in grado di verificare l'errore nel posizionamento X, Y e Z a cui è soggetto istante per istante. Tramite la trasmissione dati mediante GSM tale errore viene trasmesso in tempo reale all'altro ricevitore GPS, definito rover, che può quindi registrare misure già corrette.

WGS 84		Gauss Boaga - Est		H ellissoidica	H geoidica
Latitudine	Longitudine	Coord. Est	Coord. Nord	m	m
44°27'03,7129"N	12°17'33,8264"E	2304601,368	4925552,856	44,299	4,982

Tab. 7.1 – Caposaldo materializzato sul tetto dello stabilimento balneare n.22 (Punta Marina).

Il sistema consente di ottenere misure topografiche con una precisione millimetrica che dipende dalla distanza tra base e rover, dall'accuratezza dell'operatore e dalla calibrazione locale per la trasformazione dalle coordinate sorgenti GPS (Lat. Long. in formato WGS 84) al reticolo di riferimento. Utilizzando questo sistema d'acquisizione l'errore massimo, nella misurazione dei punti del profilo, è valutabile in circa due centimetri. Date le finalità dei rilievi e le caratteristiche del territorio in esame si può ritenere questa tolleranza nella misura ampiamente soddisfacente.

Come appena accennato le coordinate sorgenti dei punti GPS rilevati vengono trasformate nelle coordinate del reticolo di riferimento scelto, in questo caso Gauss Boaga fuso Est.

Per i rilievi batimetrici, oltre al posizionamento X Y Z, realizzato con la stessa strumentazione del rilievo topografico, è necessario conoscere la profondità dell'acqua. A tale scopo è impiegato un ecoscandaglio idrografico single-beam ODOM HYDROTRACK che, opportunamente tarato, consente precisioni centimetriche: relativamente alle profondità indagate (-1/-6 m) la precisione è di circa  $\pm 2,5$  cm.

Pertanto il ricevitore GPS, in comunicazione con la base posizionata sul caposaldo, esattamente come per i rilievi a terra, viene alloggiato all'estremità superiore di un'asta resa solidale con l'imbarcazione, mentre il trasduttore dell'ecoscandaglio viene collocato all'estremità inferiore, sotto il pelo libero dell'acqua.

Le informazioni fornite dai due strumenti (posizionamento proveniente dal GPS, inclusa la lunghezza dell'asta, e la misura della colonna d'acqua sotto il trasduttore

proveniente dall'ecoscandaglio) vengono associate da un apposito programma di navigazione (Navigator Professional) che registra i dati con la frequenza di 1 Hz.

Durante l'acquisizione dei dati vengono registrate le quote ellissoidiche fornite dal GPS che, nella fase di processing, vengono trasformate in quote geodetiche; lo scostamento utilizzato per tale trasformazione è quello medio calcolato sui capisaldi limitrofi, pari a  $N = 39.317$  m. La zona di lavoro si ritiene sufficientemente piccola da consentire l'applicazione di tale valore costante per tutta l'area.

Questa tecnica d'acquisizione dati, relativamente complessa, offre, tra l'altro, la possibilità di seguire, con precisione, rotte di navigazione precedentemente stabilite e di non dover poi compensare i rilievi batimetrici con il valore di marea, che non sempre è possibile stabilire con sufficiente precisione. Infatti, le misure, essendo riferite all'ellissoide, non esprimono la misura della profondità dell'acqua, ma il dislivello tra quest'ultimo e lo zero e, con un'operazione algebrica si giunge all'effettiva profondità del fondale.

### 7.1.1 Rilievi batimetrici con ecoscandaglio multi-beam (MBES)

---

Il rilievo batimetrico con ecoscandaglio di tipo multi-beam permette di ottenere la copertura totale dell'area da investigare con un elevato numero di punti campionati per unità di superficie; infatti questo ecoscandaglio, a differenza del single-beam, è in grado di irradiare una superficie molto ampia di fondale, poiché con un singolo impulso è possibile campionare il fondale, perpendicolarmente alla direzione di avanzamento dell'imbarcazione, in 240 punti (beams) su di un corridoio ampio circa 3,4 volte la profondità dell'acqua.

Come nel caso precedente anche in qui all'ecoscandaglio viene associato il ricevitore GPS in comunicazione con la base mediante rete GSM. I dati batimetrici sono stati acquisiti con un sistema multi-beam R2Sonic 2024. Il sistema è stato interfacciato al sistema di navigazione "QINSy" attraverso il quale i dati vengono georiferiti e ricevono le necessarie compensazioni di moto fornite da alcuni strumenti di supporto.

Sull'imbarcazione viene installata una girobussola IXSea Octans che fornisce un'indicazione della rotta (heading) riferita al nord geografico. La stessa, dotata di sensore di moto integrato, con un completo e codificato sistema di trasmissione, invia i dati al software di navigazione, garantendo l'applicazione delle correzioni d'oscillazione, rollio, beccheggio, ecc. al dato di batimetria acquisito dal sistema.

Durante le operazioni è essenziale che i dati MBES, con le appropriate correzioni di offset, siano riferiti alla reale verticale. Ogni deviazione nel roll (rollio) si traduce in errori nella misura della profondità nei beam più esterni, crescenti all'aumentare dell'angolo dei beam. Le deviazioni nel pitch (beccheggio) possono dare luogo ad errori di posizione lungo la traccia e, similmente, gli offset di yaw tra il piano del trasduttore MBES e l'allineamento dell'imbarcazione fornito dalla girobussola possono causare errori di posizione nei beam più esterni. Questi errori tendono ad aumentare al crescere sia dell'apertura dei beam, sia della profondità. Al fine di eliminare eventuali errori vengono eseguiti test di calibrazione sfruttando le caratteristiche topografiche del fondo; sono state realizzate "spazzate" (linee d'acquisizione) con orientamento opposto e differenti sovrapposizioni in modo tale da farle coincidere per determinare successivamente le differenze in termini di angoli tra i sensori di moto e la testa del multi-beam. Viene pertanto scelta un'area con una caratteristica ben distinguibile sul fondo per la calibrazione del pitch e dello yaw ed un'area con il fondo piatto per la calibrazione del roll; vengono controllati tutti i sensori per assicurare l'accuratezza delle misure:

- sensori di roll, pitch e heading;
- sensori di posizione;
- sensori MBES.

Infine per massimizzare l'accuratezza delle acquisizioni effettuate con il sistema MBES, durante il rilievo è stato eseguito un profilo di velocità del suono. La misura è stata effettuata mediante una sonda multiparametrica (CTD) SBE 19 plus, della Sea-Bird Electronics, Inc. opportunamente calata dalla superficie al fondo. I valori di velocità del suono ottenuti, espressi secondo l'algoritmo di Chen-Millero (m/s), vengono introdotti nel software di acquisizione QINSy al fine di garantire la qualità dei dati batimetrici rilevati.

## 7.2 Campionamenti sedimentologici ed analisi granulometriche

---

Per la caratterizzazione tessiturale della spiaggia emersa e sommersa sono stati raccolti campioni rappresentativi dei sedimenti superficiali.

Le spiagge emerse sono state campionate a mano, in prestabilite posizioni morfologiche (duna se presente, spiaggia e battigia), raccogliendo circa 3 hg di sedimento superficiale, mentre il campionamento dei fondali è stato condotto, utilizzando una benna tipo Van Veen da 2 litri (Fig. 7.2), ad ogni batimetrica con passo di 1 m fino ad una profondità massima di -6 m.

Nel caso di campionamento dell'intera area di studio, sono stati raccolti campioni lungo 11 transetti, mentre per quanto riguarda il campionamento della sola area dell'intervento di difesa sono state selezionate 6 sezioni comprese tra il pennello "ruvido" a nord e l'inizio delle barriere foranee a sud, con campionamento alle batimetriche dei 2, 3 e 4 m.

I materiali raccolti, opportunamente sigillati e corredati d'appropriata segnatura (sigla, data di prelievo, coordinate della posizione, ecc.), sono successivamente stati analizzati presso il laboratorio sedimentologico del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara.



Fig. 7.2 – Fase di campionamento con benna Van Veen.

Le analisi tessiturali dei campioni di sedimento avvengono secondo una procedura standard. Circa 100 g di ogni campione viene sottoposto, dopo una quartatura, ad ossigenatura con acqua ossigenata a 16 volumi, al fine di liberarli totalmente della materia organica. Quest'ultima, essendo dotata di un forte potere collante con il fango, può alterare il comportamento del sedimento stesso e dunque le proprietà granulometriche. Terminata tale fase la frazione sabbiosa e quella fangosa vengono separate mediante la tecnica della separazione ad umido con un setaccio con maglia a 63  $\mu\text{m}$ . A questo punto le due frazioni seguono un diverso percorso di preparazione.

Le sabbie, dopo essere state essiccate a 105°C vengono setacciate per eliminare eventuali bioclasti ancora presenti e pesate. La successiva quartatura permette di selezionare circa 3 g di materiale che verrà poi analizzato con la bilancia di sedimentazione. Lo strumento in questione è composto di un cilindro verticale lungo 182 cm riempito con acqua distillata e di una bilancia. Attraverso la Legge di Stokes, e quindi la velocità di caduta del sedimento, si calcola il peso del materiale che si deposita al fondo sul piatto della bilancia ed il tempo impiegato, ottenendone il diametro relativo. E' dunque fondamentale conoscere il peso specifico del sedimento e la temperatura dell'acqua per tarare la densità e la viscosità dell'acqua.

Il fango, composto da silt ed argilla, se in quantità > 5% del campione totale, viene fatto decantare in beker al fine di eliminare l'acqua in eccesso; ne vengono quindi prelevati 8-13 g ed inseriti nel sedigrafo Micromeritics Sedigraph 5100. Tale strumento utilizza raggi X irradiando il campione inserito nell'agitatore. Il diametro del campione analizzato viene calcolato in funzione dell'assorbanza di un fascio di raggi X fortemente collimato da parte delle particelle in via di sedimentazione.

I dati analitici delle analisi sedimentologiche sono stati memorizzati sottoforma di file ed elaborati utilizzando un software (Sedimcol v. 1.06) appositamente sviluppato dal Dipartimento di Scienze della Terra di Ferrara. Sono stati dunque determinati i principali caratteri tessiturali dei sedimenti analizzati. Associando i dati ottenuti dalle due analisi per ogni campione vengono determinate le percentuali di ogni classe granulometrica rappresentata, ed utilizzando alcuni percentili caratteristici della curva cumulativa vengono calcolati i parametri statistici relativi alla distribuzione dimensionale del sedimento: media, classazione, asimmetria, appuntimento, ecc.

### 7.3 Clima meteo-marino

---

Durante l'intero periodo di studio sono stati raccolti i dati ondametrici registrati dalla boa "Nausicaa", di proprietà della Regione Emilia-Romagna, posizionata circa 8 km al largo di Cesenatico, alla profondità di 10 m; il sistema ricevente a terra è situato presso la struttura oceanografica Daphne a Cesenatico. I dati di altezza, periodo di picco e periodo medio e direzione delle onde sono acquisiti ogni 30' ed archiviati nel database meteo-marino del Servizio Idro-Meteo-Clima (SIMC) che li rende disponibili online (<http://www.arpa.emr.it/sim/?mare/boa>).

Per quanto riguarda i dati mancanti, non registrati dalla boa in oggetto, sono stati reperiti dati registrati dalla boa RON di Ancona, forniti da ISPRA - Servizio Mareografico (<http://www.telemisura.it>). La stazione ondametrica di Ancona, costituita da un ondometro direzionale TRIAXYS, è posizionata nel punto di coordinate geografiche 43°49'47,21"N e 13°42'52,49"E, su fondali di circa -100 m s.l.m. Essa effettua registrazioni ogni mezz'ora in continuo per qualsiasi altezza d'onda.

I dati raccolti sono stati opportunamente catalogati ed archiviati per correlazioni successive con i rilievi di campagna.

### 7.4 Elaborazione ed analisi dei dati

---

L'analisi della morfologia della spiaggia emersa viene eseguita a partire dall'elaborazione dei profili topografici lungo i transetti perpendicolari a costa. Tali transetti rilevati ripetutamente nel corso dei due anni di campagne di misura permettono di analizzare con dettaglio l'evoluzione nel tempo dei vari tratti di litorale.

L'analisi della variazione della linea di riva è stata possibile attraverso l'utilizzo di un *tool* in ambiente GIS, denominato DSAS® (*Digital Shoreline Analysis System*) in grado di computare lo spostamento di isolinee rispetto ad una linea base di riferimento, scelta sulla spiaggia emersa e non coincidente con la linea di riva. Lo strumento calcola lo spostamento lungo dei transetti perpendicolari alla linea base ed intervallati di una misura scelta dall'operatore.

Per quanto riguarda l'elaborazione dei rilievi dei fondali, sono state elaborate lungo le 29 transetti la morfologia in sezione, come per i rilievi topografici.

Per quanto riguarda la stima del volume di sedimento versato nel ripascimento sommerso è stata utilizzato il software CEDAS e nello specifico il modulo BMAP - BMAP - *Beach Morphology Analysis Package*, il quale permette di analizzare l'evoluzione morfologica di un profilo, a partire dalla sua rappresentazione in sezione.

La determinazione del volume versato è stata condotta mediante comparazione di ogni profilo rilevato prima e dopo i lavori, identificandone le variazioni espresse in  $m^3/m$ . Il computo è stato realizzato sul confronto di ogni profilo definendo a priori una distanza comune.

Le variazioni rilevate in corrispondenza del profilo sono state, successivamente, estese lateralmente per una distanza pari alla metà di quella intercorrente tra un profilo e l'altro. In questo modo si è ottenuta la variazione volumetrica dell'intero tratto di intervento (500 m), assumendo come superficie di riferimento la massima identificabile dai rilievi effettuati.

Per ogni rilievo sono state ricostruite per interpolazione le isobate con passo di 0,25 m. Sono stati inoltre elaborati modelli tridimensionali dei fondali, che hanno l'indiscutibile pregio di facilitare l'interpretazione delle morfologie, nonché di poter computare volumi e variazioni di quota.

E' importante in questa sede specificare il tipo di elaborazione eseguita poiché i risultati ottenuti sono fortemente condizionati dal tipo di procedura adottata. Il tipo di modellizzazione tridimensionale scelta è la *Triangular Irregular Networks (TIN)*, particolarmente flessibile ed adattabile alla morfologia, poiché i nodi della maglia di interpolazione è posizionata irregolarmente sulla superficie, ottenendo così un'alta risoluzione.

Questo tipo di metodo di realizzazione di superfici 3D soddisfa il criterio di triangolazione di Delaunay<sup>4</sup>. L'elaborazione dei TIN prevede l'inserimento di un'area ben definita chiamata *blank* o maschera che definisca in modo planare le dimensioni

---

<sup>4</sup> Il criterio di triangolazione di Delaunay assicura che non vi siano vertici all'interno di uno dei cerchi circoscritti ai triangoli della rete. Se tale criterio è soddisfatto ovunque nell TIN, l'angolo interno minimo di tutti i triangoli è massimizzato; ne risulta che i triangoli sottili vengono evitati per quanto possibile.

della superficie da rappresentare ed i punti o le linee del rilievo. Chiaramente più le informazioni X Y Z sono fitte e distribuite in maniera omogenea, maggiore sarà la precisione ed il dettaglio della restituzione.

Lo studio delle variazioni volumetriche dei fondali è stato affrontato comparando due differenti rilievi mediante operazioni tra TIN. Un *tool* del *3D Analyst*, denominato *Cut & Fill*, permette una sottrazione tra le due superfici scelte e quindi un calcolo delle variazioni volumetriche (aree erose ed aree con depositi). Per una rappresentazione della variazione di quota dei fondali espressa in metri, vengono elaborate delle immagini *raster* (GRID).

E' però importante considerare l'eventuale errore sia nell'elaborazione del TIN che nel calcolo dei volumi accumulati/erosi ottenibile tramite un'operazione di sottrazione tra due TIN.

La corretta rappresentazione del TIN dipende dai dati di input: le isobate di ogni singolo rilievo ed il poligono che delimita l'area di calcolo (maschera). Anche se quest'ultima è fissa, alcuni triangoli potrebbero cadere al di fuori dell'area di calcolo e pertanto venire mascherati e non essere considerati nell'elaborazione 3D; il risultato finale dipende da quale punto o "nodo" l'interpolatore sceglie per agganciarsi.

Questo chiaramente da un errore sull'elaborazione della superficie 3D. Se a partire da tali TIN vengono calcolati i volumi accumulati o erosi da un rilievo a quello successivo, ai bordi della maschera vi potranno essere degli errori di calcolo. Infine se sommano algebricamente le variazioni volumetriche calcolate tra due rilievi consecutivi, al fine di stimare la variazione totale intercorsa tra il primo e l'ultimo rilievo eseguito, chiaramente gli errori vanno a sommarsi. Sono state effettuate delle stime sul potenziale errore commesso con la somma algebrica delle variazioni parziali: è stata stimata una differenza di  $5.200 \text{ m}^3$  sull'intera area (circa  $0,004 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ).

La valutazione delle variazioni volumetriche per ognuna delle 7 celle ovviamente accresce il potenziale errore commesso se tali valori venissero sommati. Infatti, poiché l'area che racchiude il TIN relativamente ad ogni cella non è costante per i vari rilievi. Ne deriva che i volumi computati hanno un valore che può essere considerato corretto per il singolo confronto. Se venissero sommati ad uno ad uno tutte le variazioni volumetriche riscontrate ad ogni confronto, è stato stimato un errore che nel peggiore

dei casi arriva a circa 3,5 cm di quota (ad esempio nella cella che racchiude l'area più piccola). Chiaramente in altre celle l'errore stimato risulta essere molto inferiore, fino ad essere considerato nullo.

Alla luce di tali considerazioni, nella valutazione quantitativa dei volumi accumulati/erosi nell'area di studio è necessario tener sempre presente quali siano gli errori probabili contenuti nel calcolo e tentare di ridurre al minimo le operazioni ed i computi effettuati, in modo tale da evitare una sommatoria di errori che inficerebbero il risultato finale.

Per quanto riguarda i dati sedimentologi sono state rappresentate delle mappe tematiche ed in particolare quelle della distribuzione del diametro medio ( $M_z$ ) e della classazione ( $\sigma$ ). Inoltre i vari parametri tessiturali sono stati confrontati ed analizzati mediante grafici binari.

L'analisi del moto ondoso incidente sul tratto di litorale in esame ha previsto la trasposizione dei dati ondometrici registrati dalla boa ondometrica "Nausicaa" di Cesenatico e dalla boa RON di Ancona, poiché le registrazioni ondometriche dirette effettuate presso queste boa, pur essendo rappresentative dell'esposizione climatica del paraggio considerato, non tengono conto della distinta posizione geografica del sito di interesse. Il metodo di trasposizione consiste nel determinare la corrispondenza tra le caratteristiche del moto ondoso relativo al punto di misura e le caratteristiche del moto ondoso relativo al punto di interesse. L'ipotesi di base della metodologia consiste nel supporre che le condizioni di vento (velocità e direzione), che hanno determinato le condizioni di moto ondoso nel punto di registrazione, siano le stesse anche nell'area di generazione relativa al punto di interesse. Inoltre si ipotizza che le aree di generazione del moto ondoso possano essere determinate per ciascun punto utilizzando il concetto di *fetch* efficace.

Nel caso di *fetch* limitati, le leggi che permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa spettrale  $H_{m0}$  e il periodo di picco spettrale  $T_p$  in funzione della lunghezza del *fetch* e della velocità del vento sono le seguenti (Vincent, 1984, USACE, 1984):

$$\frac{gH_m}{U_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left( \frac{gF}{U_A} \right)^{1/2}, \quad \frac{gT_m}{U_A^2} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left( \frac{gF}{U_A} \right)^{1/3}$$

dove: **UA** è il fattore di velocità del vento (*wind stress factor*), dipendente in modo non lineare dalla velocità del vento misurata alla quota +10 m s.l.m ed **F** è il *fetch* efficace relativo ad una prefissata direzione geografica.

Dunque, indicando con gli apici M e T rispettivamente le grandezze relative al punto di misura e al punto di trasposizione, fissata una direzione geografica (direzione media da cui spira il del vento) alla quale risultano associati i *fetch* efficaci FM e FT, le precedenti relazioni permettono di stabilire la ricercata corrispondenza tra le altezze ed i periodi delle onde relative al punto M e al punto T:

$$\frac{H_{m0}^T}{H_{m0}^M} = \left( \frac{F^T}{F^M} \right)^{1/2} = (K_F)^{1/2}, \quad \frac{T_{m0}^T}{T_{m0}^M} = \left( \frac{F^T}{F^M} \right)^{1/3} = (K_F)^{1/3}$$

Per ottenere le precedenti relazioni si è supposto che il fattore di velocità del vento sia lo stesso nei due punti in esame. Tale assunzione deriva dall'aver ipotizzato che le aree di generazione dei due punti siano interessate dalla stessa perturbazione climatica e quindi dalla stessa velocità del vento.

Il termine KF è il parametro di trasposizione geografica; valori inferiori ad 1 implicano un'attenuazione delle caratteristiche del moto ondoso nel punto di trasposizione rispetto a quello di misura e viceversa. In questo modo i dati ondometrici registrati dalle due boe sono stati trasferiti geograficamente al largo di Punta Marina, nel punto T, distante circa 5 km da costa, e localizzato a -10 m, ottenendo così una serie temporale valida per il paraggio in esame:

Punto T	WGS84 UTM33		GAUSS BOAGA EST	
	NORD	EST	NORD	EST
T	4.927.174	289.442	4.927.191	2.309.447

Tab. 7.2 – Coordinate punto di trasposizione (T) al largo di Punta Marina.

Da tutte le ondazioni registrate dalla boa "Nausicaa" e dalla boa RON di Ancona, trasferite nel punto al largo di Punta Marina, sono stati selezionati gli eventi di mareggiata.

In letteratura non vi è una definizione univoca di mareggiata, in quanto le soglie di altezza d'onda e durata dell'evento sono spesso specifiche del contesto territoriale in cui vengono applicate. Ad esempio, il CNR-ISMAR, nel "*Wind and Waves in the Northern Adriatic Sea*" (Cavaleri et al., 1996), attribuisce all'evento un valore soglia dell'altezza significativa massima superiore a 2 m, mentre l'intervallo tra due eventi successivi deve essere di almeno 24 ore e, tra due picchi successivi, l'altezza significativa deve abbassarsi a meno del 50% del primo picco.

Boccotti (1997) individuò per il Mediterraneo un valore soglia di = 1,5 m (1997). Valori osservati di altezza d'onda superiori all'altezza di soglia appartengono, dunque, ad una tempesta. Inoltre, la tempesta continua anche se l'altezza dell'onda si riduce a valori inferiori della soglia, purché la durata di tale riduzione sia inferiore ad un tempo massimo prestabilito che per il Mediterraneo può essere fissato in 12 ore.

Piscopio et al. (2002) hanno definito "mareggiata" l'evento ondoso caratterizzato da altezze d'onda superiori ad 1 metro, per almeno 6 ore consecutive; per la selezione degli eventi è stato posto l'intervallo minimo tra due eventi distinti pari a 3 ore.

Secondo l'Atlante delle onde dei mari italiani (Corsini et al., 2004), invece, viene definito un evento di mareggiata quando l'altezza significativa dell'onda ( $H_s$ ) supera la soglia di 1,0 m per almeno 12 ore consecutive e due eventi successivi vengono considerati separatamente se vi è un intervallo di almeno 6 ore consecutive in cui l'altezza significativa scende sotto quella soglia. Inoltre, viene definito un altro parametro soglia nell'individuazione della mareggiata in funzione della direzione di provenienza: l'evento deve essere caratterizzato infatti da una direzione di provenienza  $\pm 30^\circ$  rispetto alla direzione iniziale.

Lo studio condotto sulle mareggiate e gli impatti sulla costa in Emilia-Romagna (Perini et al., 2011) definisce mareggiata l'evento caratterizzato da un'altezza significativa minima di 1,5 m, che abbia una persistenza di almeno 6 ore. Inoltre vengono definiti due eventi indipendenti se l'altezza significativa rimane sotto la precedente soglia per almeno 3 ore consecutive, non citando alcun filtro sulla direzione di provenienza. Tali valori di riferimento sono stati definiti nel corso dello studio dei dati ondometrici in Emilia-Romagna, iniziato con il progetto CADSEALAND (AA.VV., 2006) e proseguito all'interno del progetto MICORE ([www.micore.eu](http://www.micore.eu)).

Un contributo a tale progetto è stato il recente lavoro sul litorale regionale affrontato da Armaroli et al. (2012) il quale tratta della soglia critica delle mareggiate in grado di determinare dei cambiamenti morfologici e danni alle infrastrutture.

Gli autori hanno stimato tale valore in funzione della tipologia di spiaggia (naturale o urbanizzata), calcolando il livello massimo d'acqua MWL (*surge*+marea+onde), a seconda del tempo di ritorno delle mareggiate. In generale, per spiagge urbanizzate (come la maggior parte del litorale regionale) mareggiate con altezze d'onda  $\geq 2$  m e valori di *surge*+marea  $\geq 0,7$  m sono in grado di inondare fino a 2/3 delle spiagge emiliano-romagnole.

A partire da tali studi, specifici del litorale emiliano-romagnolo, è stato scelto il valore soglia proposto da Perini et al. (2011), per l'individuazione degli eventi di mareggiata avvenuti nel periodo di studio. Per ogni evento di mareggiata è stata inoltre calcolata l'energia, utilizzando il metodo proposto da Jimenez and Mendoza (2004):

$$E = \int_{t_1}^{t_2} H_s^2 dt \quad [m^2 \cdot hr]$$

dove  $t_1$  e  $t_2$  definiscono la durata della mareggiata e  $H_s$  l'altezza significativa.

Secondo la classificazione proposta da Mendoza and Jimenez (2004) gli eventi possono essere definiti secondo 4 classi, in funzione dell'intervallo energetico a cui appartengono (Tab. 7.3).

Tale metodo è stato già testato sulla costa emiliano-romagnola in studi precedenti (Armaroli et al., 2007; Valentini et al., 2009).

Storm Class	Energy range ( $m^2 \text{ hr}$ )
<b>I - Weak</b>	$E \leq 58,4$
<b>II - Moderate</b>	$58,4 \leq E \leq 127,9$
<b>III - Significant</b>	$127,9 \leq E \leq 389,7$
<b>IV - Severe</b>	$389,7 \leq E \leq 706,9$
<b>V - Extreme</b>	$E > 706,9$

Tab. 7.3 – Categorie di mareggiata basate sul contenuto di energia ondosa (Jimenez and Mendoza, 2004).

## 8 Risultati

---

Lo studio del litorale scelto come sito campione è stato svolto a partire dall'analisi morfologica della spiaggia e dei fondali e dall'analisi della distribuzione granulometrica dei sedimenti, durante i 32 mesi di osservazione. I rilievi svolti, a cadenza stagionale, a partire dal rilievo di fine intervento (Maggio 2010) fino all'ultimo rilievo eseguito ad Ottobre 2012. Tali attività hanno avuto lo scopo di seguire e comprendere l'evoluzione e la performance del ripascimento sommerso accompagnato da un ripascimento della spiaggia emersa e dalla messa in opera di un *reef* artificiale, in termini di redistribuzione del materiale versato e conseguente risposta morfologica del sistema costiero, in funzione delle caratteristiche meteo-marine registrate.

### 8.1 Analisi topo-batimetrica

---

#### 8.1.1 Evoluzione della spiaggia emersa

---

Il tratto costiero di studio ha un'estensione di quasi 2 km; al suo interno è stato versato un volume di circa 19.000 m<sup>3</sup> di sabbia per una lunghezza di circa 800 m, tra il pennello "ruvido" a Nord e il sistema di difesa rigida a celle a Sud (23,7 m<sup>3</sup>/m).

La spiaggia emersa, dopo l'intervento, ha un'ampiezza variabile, da circa 120 m in prossimità del pennello "ruvido" a circa 45 m davanti alla duna (P19, Fig. 8.1). Nella porzione sottoflutto, invece, l'ampiezza della spiaggia è in media circa 65-70 m. La morfologia della spiaggia emersa è tipicamente tabulare, con quote di circa 1,5 m e pendenze inferiori ad 1° nel retrospiaggia e di circa 2,3° in corrispondenza della spiaggia intertidale.

### Variazione della linea di riva

Dalla fine dei lavori eseguiti in Maggio 2010 fino alla data dell'ultimo rilievo, Ottobre 2012, la linea di riva ha subito notevoli fluttuazioni.

Per una più agevole lettura dei risultati derivanti dall'analisi, si suddivide il tratto studiato in 3 zone: tratto A, a settentrione, libero da opere, tratto B, centrale e oggetto dell'intervento di ripascimento e tratto C, protetto dal sistema di difesa a celle (pennelli e barriere foranee).

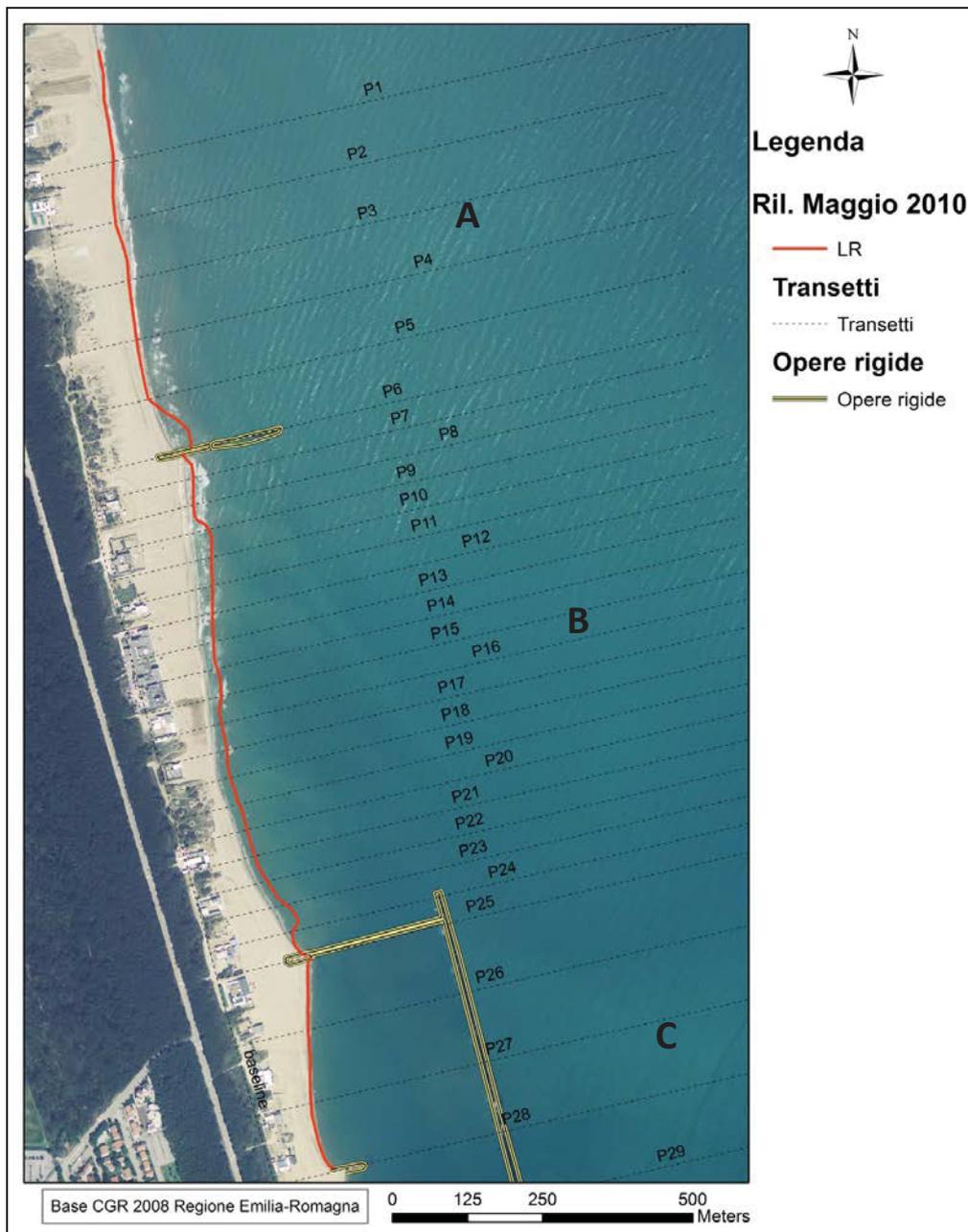


Fig. 8.1 – Rilievo della linea di riva in Maggio 2010, a fine intervento.

Osservando la Fig. 8.2, il tratto A, non interessato dal ripascimento della spiaggia emersa, dopo un anno dalla fine di questo intervento (linea blu), mostra una tendenza erosiva molto importante a ridosso del pennello “ruvido”, superando i 30 m di arretramento, che però si riduce rapidamente andando verso Nord, fino a stabilizzarsi.

Nello stesso periodo, il tratto centrale (B), oggetto del versamento di 19.000 m<sup>3</sup> di sabbia, registra un trend erosivo, con la perdita di buona parte del materiale versato. Si osservano due zone in cui la linea di riva registra il maggior arretramento, una più a Nord, con punte di -25 m e una più a Sud, verso il primo pennello delle opere disposte a celle, che raggiunge i -30 m. Il tratto centrale è quello che a meno risentito del fenomeno erosivo (-15 m). Il tratto C, completamente protetto, mostra, al contrario, un certo avanzamento della linea di riva, in media di 5 m.

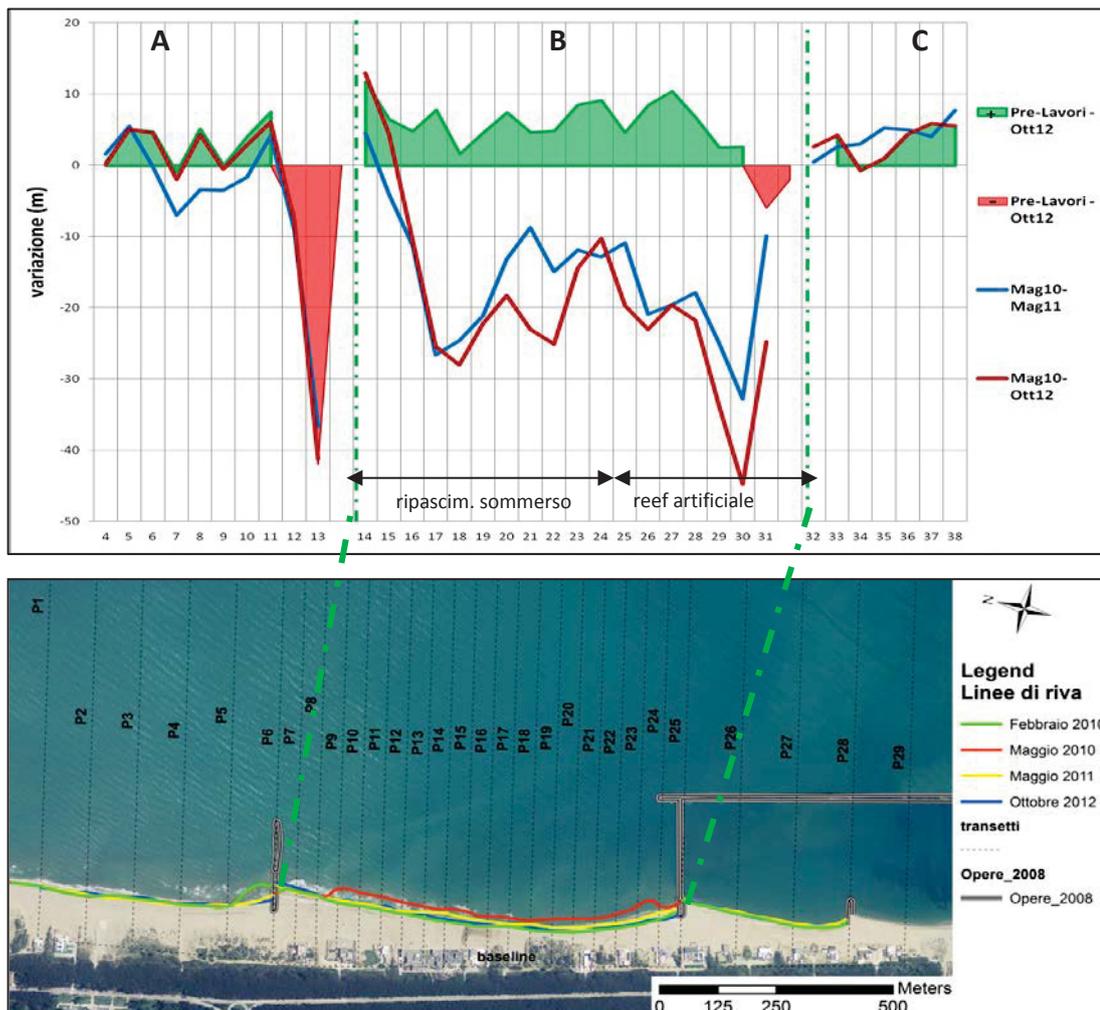


Fig. 8.2 – Variazione della posizione della linea di riva. Le aree colorate rappresentano la variazione in metri della linea di riva dallo stato precedente l’intervento all’ultimo rilievo (Ottobre 2012).

Osservando l'evoluzione per i 2 anni e mezzo, da Maggio 2010 ad Ottobre 2012 (linea rossa), le variazioni riscontrate non sono più così nette, ma mostrano una generale stabilità della linea di riva, come se il sistema sia riuscito a raggiungere un suo equilibrio. Infatti, sebbene vi sia stata una perdita di materiale versato a ripascimento, come era tra l'altro atteso dal naturale riassetto morfologico della spiaggia, la condizione del litorale è comunque positiva. Ciò è dimostrato dal confronto tra la linea di riva rilevata prima dei lavori e quella di Ottobre 2012. Tale analisi, in Fig. 8.2 con aree rosse (se erose) e verdi (se accresciute), mostra di fatto una linea di riva comunque progradata, in media di +5,3 m, a distanza di 32 mesi. Questo risultato viene considerato positivo, alla luce del trend erosivo che ha caratterizzato da anni il litorale, nonostante sia stato oggetto di diversi ripascimenti.

Nel dettaglio, durante il primo anno di osservazione (Fig. 8.3) emerge una perdita consistente del materiale versato entro i primi 7 mesi dall'intervento. Successivamente invece, il trend si inverte, mostrando una generale stabilità della costa, leggermente in avanzamento nel tratto centrale dell'intervento (tra il ripascimento sommerso ed il *reef* artificiale) e leggermente in arretramento nel periodo invernale e poi in avanzamento nel periodo estivo nel tratto in corrispondenza del *reef*.

E' interessante osservare che, come per il tratto in corrispondenza del *reef*, anche il tratto non protetto a settentrione registra un trend erosivo, con un arretramento medio della linea di riva di circa -10 m. Solo il tratto in corrispondenza del ripascimento sommerso mostra una generale stabilità, comparabile al tratto protetto dalle barriere foranee e dai pennelli (a meridione) fino a tendere ad un avanzamento (+8 m) nel tratto intermedio. In primavera, invece, tutto il tratto risulta stabile, ad eccezione della zona in corrispondenza del *reef* artificiale che mostra un avanzamento medio di +8 m.

Durante il secondo periodo di osservazione (Fig. 8.4), a partire da un anno dopo l'innovativo intervento di difesa, si registra da Maggio 2011 fino a Gennaio 2012 una sostanziale stabilità della linea di riva, con fluttuazioni entro i  $\pm 5$  m di spostamento. Le maggiori variazioni si riscontrano durante l'inverno e la primavera 2012. Nel periodo invernale, infatti, si osserva un significativo avanzamento della linea di riva, fino a +24 m, a settentrione del pennello "ruvido" ed uno di minore entità (+10 m) in corrispondenza del ripascimento sommerso e del *reef* artificiale. Tale trend positivo si

inverte in primavera (Marzo-Giugno 2012), con arretramenti medi di -10 m, per poi annullarsi fino ad Ottobre 2012.

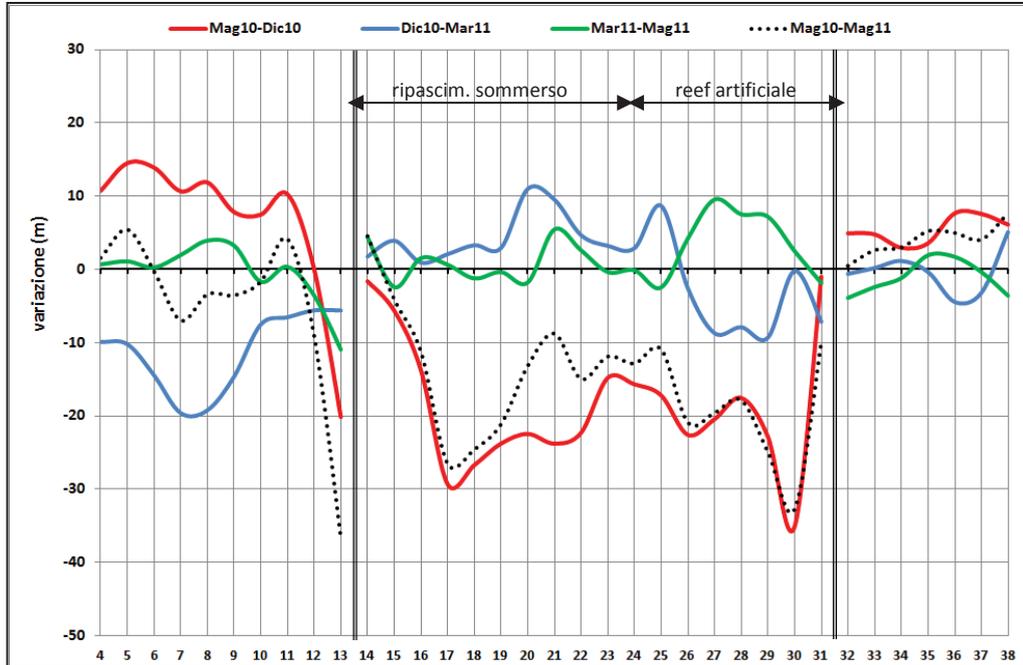


Fig. 8.3 – Variazione della linea di riva nel primo anno di osservazione (Maggio 2010 – Maggio 2011).

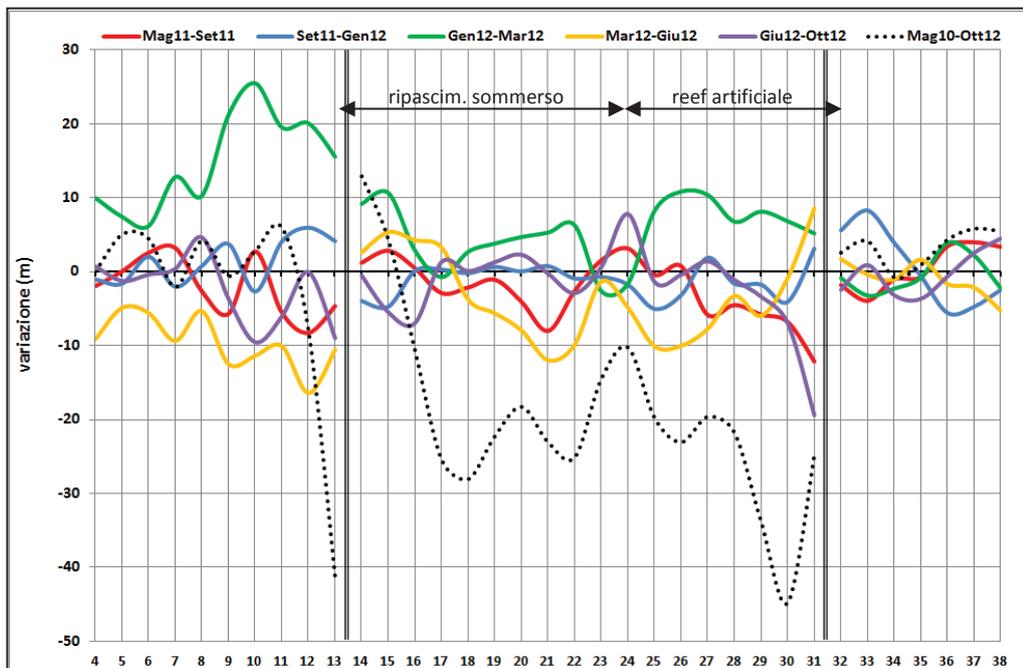


Fig. 8.4 - Variazione della linea di riva nel secondo anno e mezzo di osservazione (Maggio 2011 – Ottobre 2012). La linea a puntini rappresenta l'intero periodo di studio (Maggio 2010 – Ottobre 2012).

### **Variazione dei profili di spiaggia emersa**

Il profilo della spiaggia emersa, come la linea di riva, ha subito notevoli variazioni nel tempo. Andando ad analizzare le variazioni più significative del tratto studiato, si riporta l'elaborazione in sezione del rilievo di fine intervento (Maggio 2010) confrontato con gli 8 rilievi eseguiti nei 2,5 anni di osservazione, fino ad Ottobre 2012.

Alcuni rilievi riportano in sezione anche l'argine invernale che viene realizzato davanti agli stabilimenti balneari solitamente tra i mesi di Novembre e Dicembre, in vista delle mareggiate più importanti, con lo scopo di proteggere questi ultimi dall'ingressione marina e di preservare parte del materiale che altrimenti andrebbe rapidamente asportato dal moto ondoso. Generalmente la loro posizione è prossima agli stabilimenti; la loro forma è trapezoidale o triangolare (in sezione) ed hanno un'altezza intorno a 1 - 1,25 m rispetto al piano d'appoggio, a quota 1,5 m. La loro ampiezza in sezione è solitamente tra i 2 ed i 3,5 m. Il materiale con cui vengono realizzati gli argini, nella maggioranza dei casi viene prelevato dalla zona di battigia con delle ruspe e tirato verso l'interno. E' stato osservato che, in più occasioni, gli argini sono stati ricostruiti durante la stagione invernale, a causa del loro rapido smantellamento durante le mareggiate più energetiche; solitamente con l'arrivo della stagione turistica, gli argini vengono poi spianati ed il materiale ridistribuito sulla spiaggia, al fine di renderla praticabile dagli utenti.

Sono stati elaborati 29 profili trasversali a costa per ognuno dei rilievi eseguiti (Fig. 8.1). Per non appesantire troppo la lettura, si è deciso di riportare i grafici di alcuni profili selezionati in funzione della loro rappresentatività e della loro significatività per quanto riguarda l'evoluzione della spiaggia emersa.

Nel tratto settentrionale, non interessato dal ripascimento, il profilo di spiaggia, che a Maggio 2010 aveva una pendenza costante di  $3,6^\circ$ , dopo 7 mesi, nel Dicembre 2010, mostra un sollevamento delle quote della spiaggia emersa, in prossimità della berma, attorno a 0,25 m in media. La linea di riva è avanzata di 6-7 m e la spiaggia intertidale è meno pendente ( $2,2^\circ$ ) (Fig. 8.5).

I rilievi dei mesi successivi mostrano la formazione di una berma alla quota di +0,5 m ed un abbassamento delle quote della spiaggia emersa di circa 0,5 m. Inoltre si osserva un trend erosivo della linea di riva che raggiunge il suo massimo a Settembre

2011, rilievo in cui osserviamo i maggiori arretramenti ed un abbassamento delle quote di tutto il profilo di spiaggia fino alla berma di tempesta. I mesi successivi registrano un'inversione di tendenza fino al rilievo di Marzo 2012, dove si osserva invece un profilo di spiaggia più ampio, dovuto all'avanzamento della linea di riva rispetto a Settembre 2011 di oltre 50 m, ed una pendenza più dolce ( $1,5^\circ$ ) fino alla battigia, dov'è presente anche una berma piuttosto pronunciata. Il rilievo di Giugno 2012 già segna l'inizio di una nuova fase regressiva ancor più accentuata nell'ultimo rilievo (Ottobre 2012), quando il profilo di spiaggia torna ad avere una morfologia simile al primo rilievo (Maggio 2010) (Fig. 8.5).

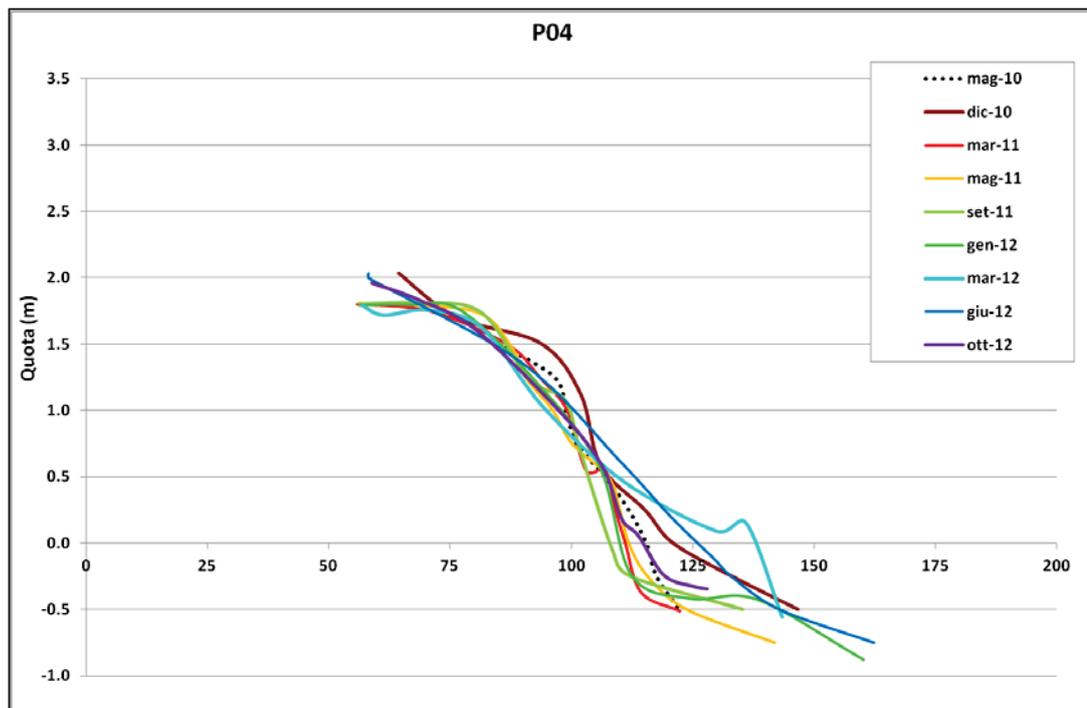


Fig. 8.5 – Variazione topografica del profilo P04 da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

Il tratto dal P06 al P24 (Fig. 8.1) è stato interessato dall'intervento di ripascimento, terminato nel Maggio 2010. Inoltre, poiché in questa zona sono presenti in maniera pressoché continua stabilimenti balneari, sono stati realizzati per il periodo invernale gli argini. Tali argini non sono però presenti in tutti i rilievi invernali, poiché non vengono realizzati contemporaneamente per tutti gli stabilimenti. Inoltre possono avere dimensioni diverse pur nella stessa stagione invernale, a causa di ricostruzioni

urgenti per mareggiate che possono averli distrutti. Osservando ad esempio il P08, ubicato a circa 85 m a meridione del pennello "ruvido", si registra la comparsa dell'argine nel rilievo di Marzo 2011, poiché in Dicembre 2010 non era ancora stato realizzato. Inoltre, sempre in Marzo si osserva un abbassamento delle quote in battigia dovuto al prelievo di materiale per la sua costruzione.

Nei mesi successivi fino a Gennaio 2012 le morfologie variano a seconda della stagione, con la formazione e lo smantellamento delle berme. La linea di riva registra una variazione importante solo in Giugno 2012, con un avanzamento di circa 10 m rispetto al rilievo di Maggio 2010. In Giugno 2012 si osserva una morfologia convessa del profilo, una spiaggia più ampia con una pendenza di circa 1° sulla porzione di spiaggia emersa e quote più elevate in media di 0,75 m. L'ultimo rilievo eseguito in Ottobre 2012 mostra un arretramento della linea di riva e un aumento della pendenza della spiaggia emersa fino a 6° circa.

I profili seguenti, fino al P17, ubicati in corrispondenza della zona in cui è stato realizzato anche il ripascimento sommerso, evidenziano uno smantellamento del sedimento versato sulla spiaggia emersa entro i primi 7 mesi dall'intervento. Il rilievo eseguito in Dicembre 2010, infatti, mostra un abbassamento delle quote di circa 0,6 m tra le quote -0,5 e +0,75 m ed un arretramento della linea di riva di 20-25 m, con il passaggio da una morfologia convessa ad una concava e la formazione di berme.

Col passaggio dell'inverno, si registra invece un innalzamento delle quote (+0,2-0,4 m) accompagnato da un avanzamento modesto della linea di riva che perdura fino al mese di Settembre 2011. Successivamente si osservano fluttuazioni stagionali, dovute in parte al clima ondosso ed in parte alla mobilitazione del sedimento per la realizzazione degli argini invernali ed il loro spianamento per la stagione balneare.

Emerge però un avanzamento di tutto il fronte di spiaggia emersa, tra le quote +0,5 e -0,5 m, registrato in Marzo 2012, ben evidente nel P12 e nel P15 (Fig. 8.8 e Fig. 8.9).

Un'altra osservazione interessante riguarda i rilievi finali di Giugno ed Ottobre 2012. Mentre nella zona settentrionale, come riporta ad esempio il P10 (Fig. 8.7), il trend di avanzamento mostrato dall'innalzamento dell'altezza della spiaggia nell'ordine di 0,4 m, tra le quote +1,5 e +0,25, perdura fino ad Ottobre, spostandoci

verso meridione tale trend si riduce, in particolare nella porzione prossima alla battigia fino ad invertirsi, come mostrato nel profilo P15 (Fig. 8.9).

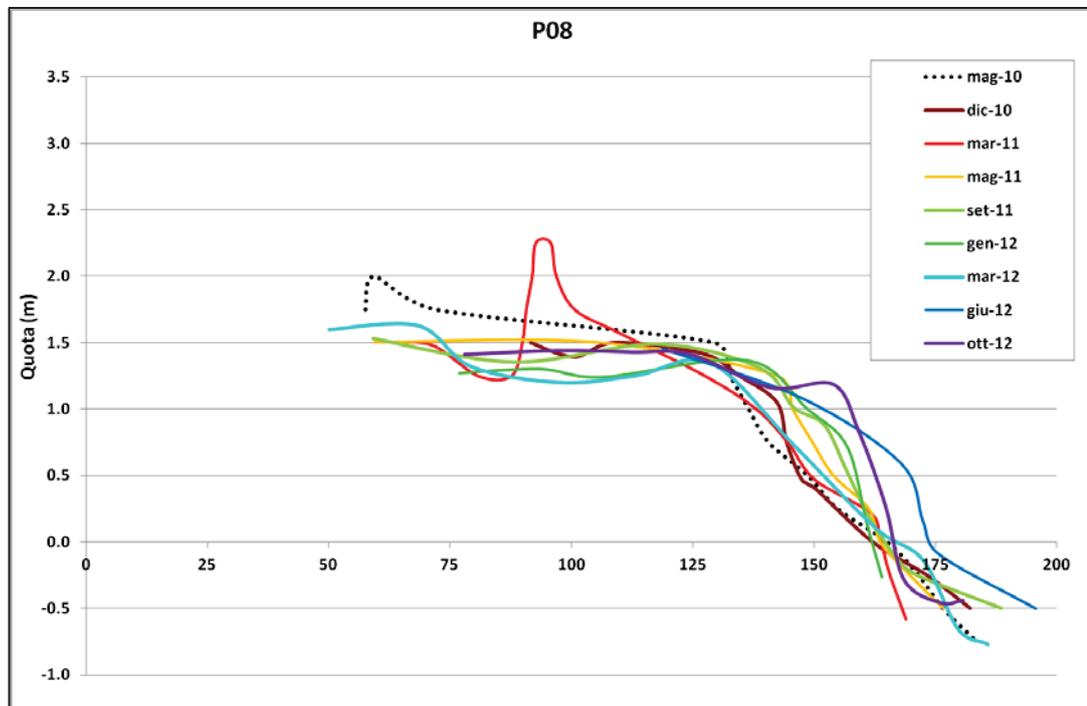


Fig. 8.6 – Variazione topografica del profilo P08 da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

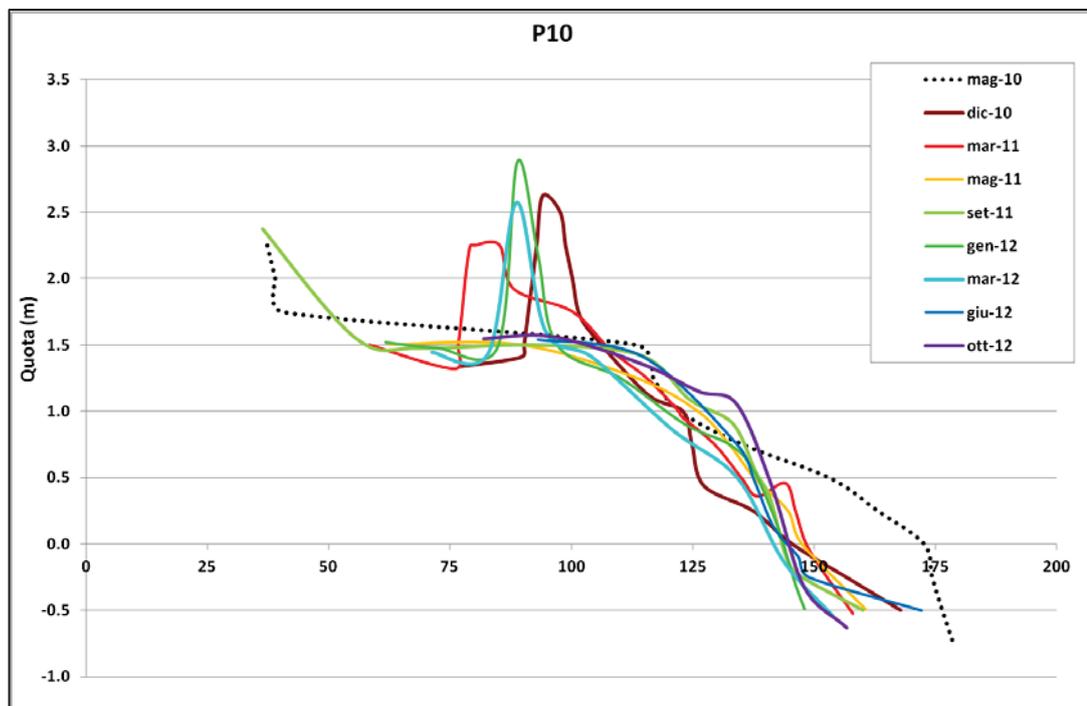


Fig. 8.7 – Variazione topografica del profilo P10 da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

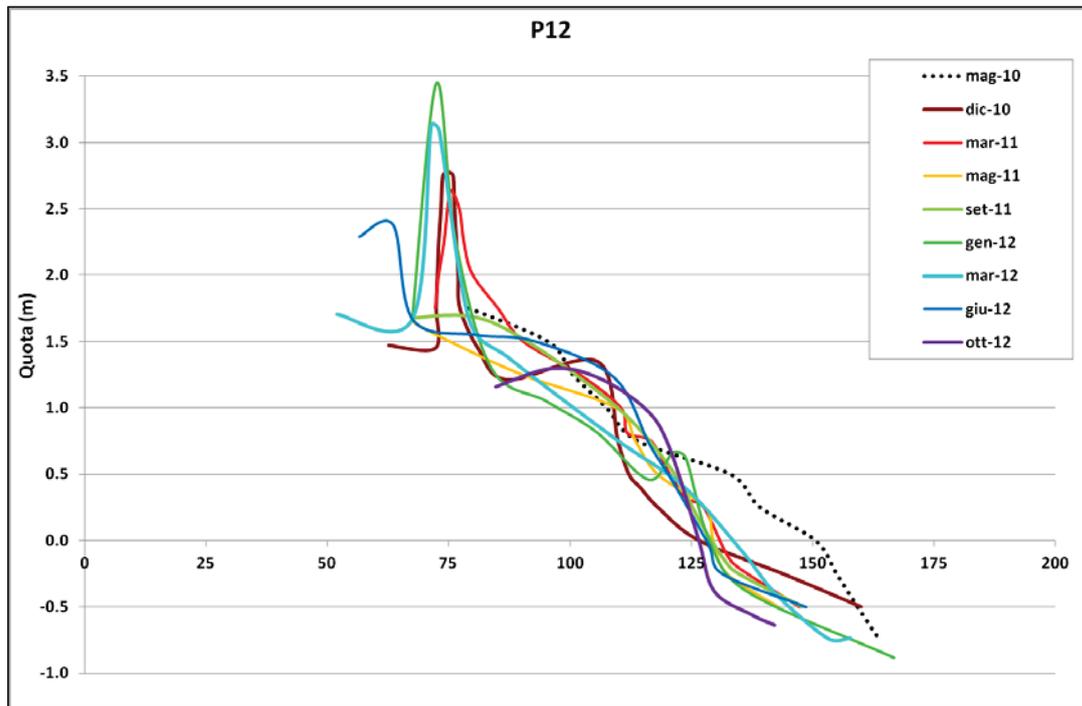


Fig. 8.8 – Variazione topografica del profilo P12 da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

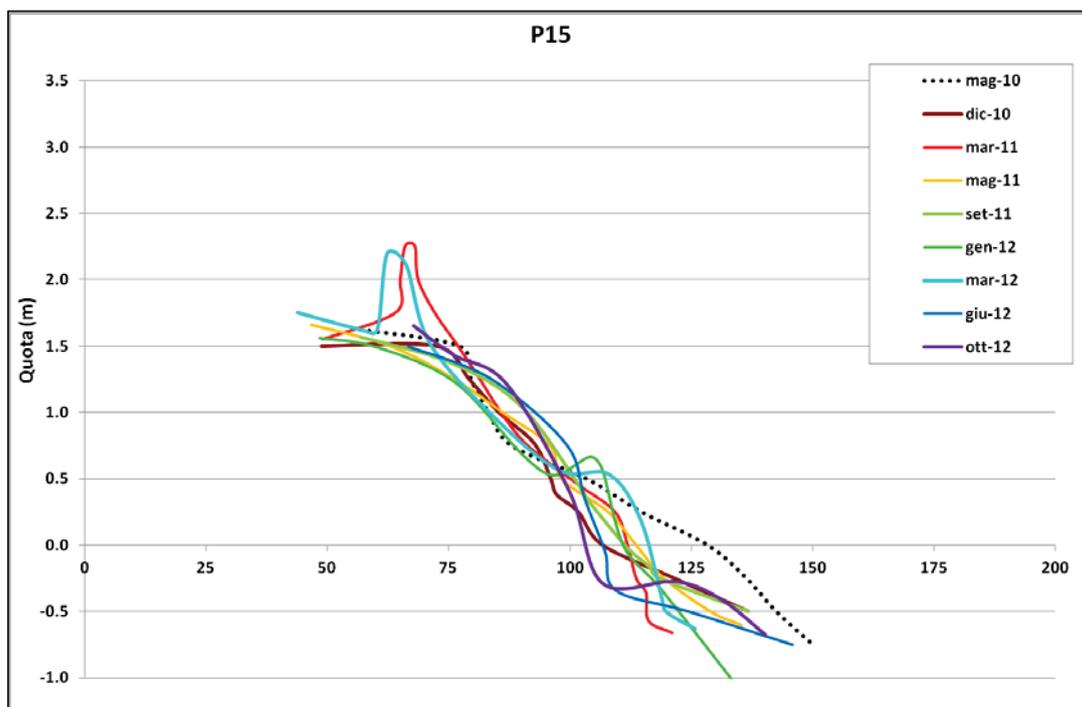


Fig. 8.9 – Variazione topografica del profilo P15 da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

I profili più a Sud dal P18 al P24 sono ubicati in corrispondenza della porzione di fondale in cui è stato messo in opera il *reef* artificiale. Osservando uno dei profili in corrispondenza della duna con estensione maggiore (P18, Fig. 8.10), si osserva un'erosione rapida del ripascimento della spiaggia nei primi 7 mesi dall'intervento e le quote rilevate sono in media più basse di 0,5 m, tra il piede della duna e -0,5 m.

E' però interessante osservare l'avanzamento registrato nel rilievo di Marzo 2011, che porta il profilo ad una posizione simile a quella post-intervento, fatta eccezione per la linea di riva, la quale, sebbene sia in posizione più avanzata rispetto al mese di Dicembre 2010, è comunque 8 m più arretrata rispetto alla fine dei lavori. I rilievi successivi mostrano, un lento trend regressivo di tutto il fronte di spiaggia fino a mese di Ottobre 2012, dove si registra un profilo con una pendenza media di 5° tra il piede della duna e la quota -0,5 m.

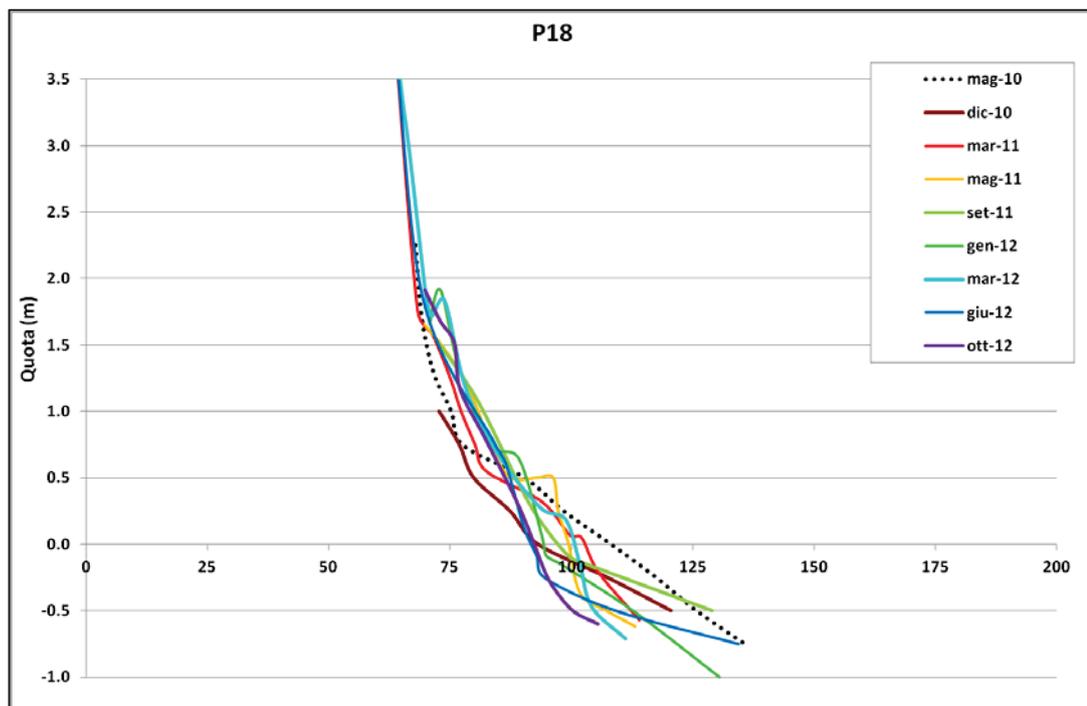


Fig. 8.10 – Variazione topografica del profilo P18 da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

I profili a meridione della duna, fino al primo pennello appartenente alla “difesa a celle” di Punta Marina, sono caratterizzati dalla presenza degli argini invernali posti

davanti agli stabilimenti balneari. Si osserva anche qui una rapida erosione del sedimento versato a ripascimento della spiaggia con un abbassamento di circa 50 cm tra +1 e -0,5 m di quota e un arretramento medio della linea di riva di 20 m. E' interessante osservare in alcuni tratti il rilievo di Marzo 2011 che mostra un arretramento molto importante della linea di riva (50 m rispetto alla fine dei lavori) ed un abbassamento delle quote della porzione di spiaggia sommersa (50-70 cm), riconducibile alla ripetuta ricostruzione dell'argine invernale dopo intense mareggiate (P20 e P21, Fig. 8.11 e Fig. 8.12).

Durante il periodo di osservazione, la spiaggia evidenzia una importante perdita iniziale di sedimento, che in parte viene compensata nei mesi seguenti. La linea di riva, così come il fronte di spiaggia, mostra un recupero del volume perso già dal rilievo di Marzo (fatta eccezione per i profili P20 e P21, Fig. 8.11 e Fig. 8.12). In generale, si osserva per la porzione di spiaggia sopra la quota di 0,5 m fluttuazioni morfologiche nella norma fino al rilievo di Settembre 2011; nei mesi di Gennaio e Marzo 2012, invece, le quote si abbassano in media di 40-50 cm, che verranno poi recuperate nei mesi di Giugno e Ottobre 2012.

Nella porzione di spiaggia intertidale, invece, il profilo di spiaggia le variazioni restano trascurabili fino a Marzo 2012, quando la linea di riva registra una posizione di 10 -15 m più avanzata, per poi arretrare nuovamente di circa 10-15 m nei mesi di Giugno ed Ottobre 2012, con conseguente abbassamento delle quote di circa 50 cm e pendenza di circa 3°.

Differente è il comportamento della spiaggia in prossimità del pennello a Sud (P24, Fig. 8.13) dove si osserva, dopo una perdita del sedimento versato lungo tutto il profilo con abbassamenti di quota oltre i 50 cm, un recupero dei volumi progressivo fino a Maggio 2011. Con la fine dell'estate 2011 si osservano arretramenti concentrati nella porzione di spiaggia intertidale, che si propagano anche sulla spiaggia emersa e che perdurano fino al mese di Gennaio 2012. Gli ultimi 2 rilievi, invece, mostrano una spiaggia emersa più ampia ed una pendenza di circa 3,6°; soltanto nell'ultimo rilievo la linea di riva arretra bruscamente portandosi in posizione più arretrata rispetto al rilievo di fine lavori di circa 36 m, comportando un aumento delle pendenze fino a 5,1°.

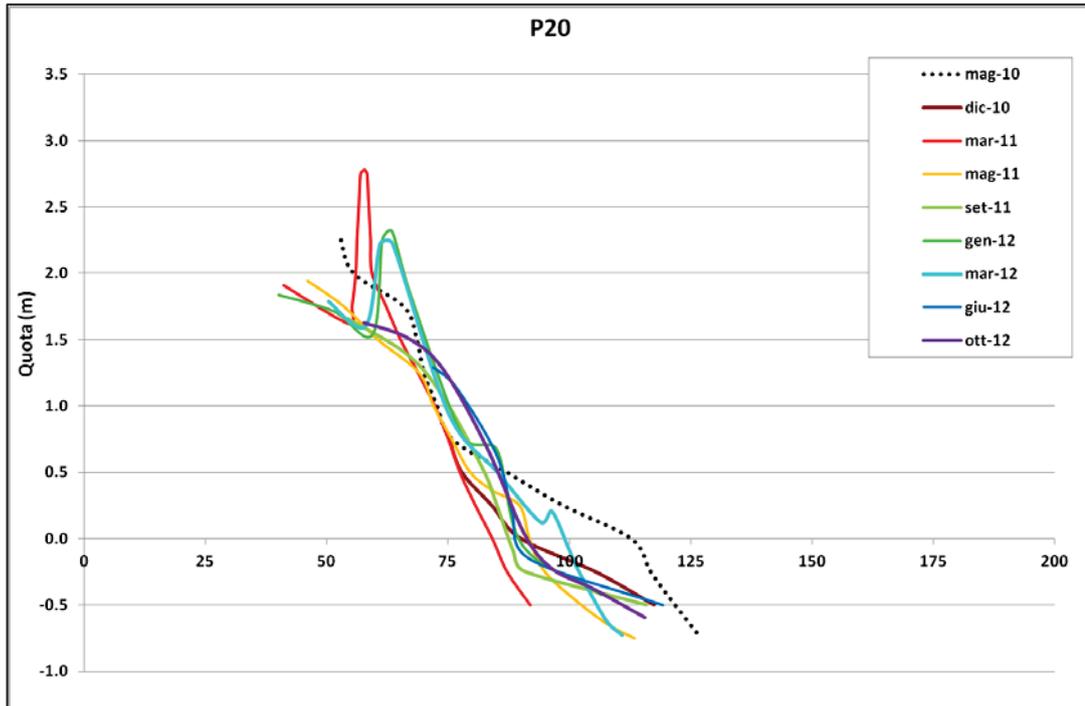


Fig. 8.11 - Variazione topografica del profilo P20 da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

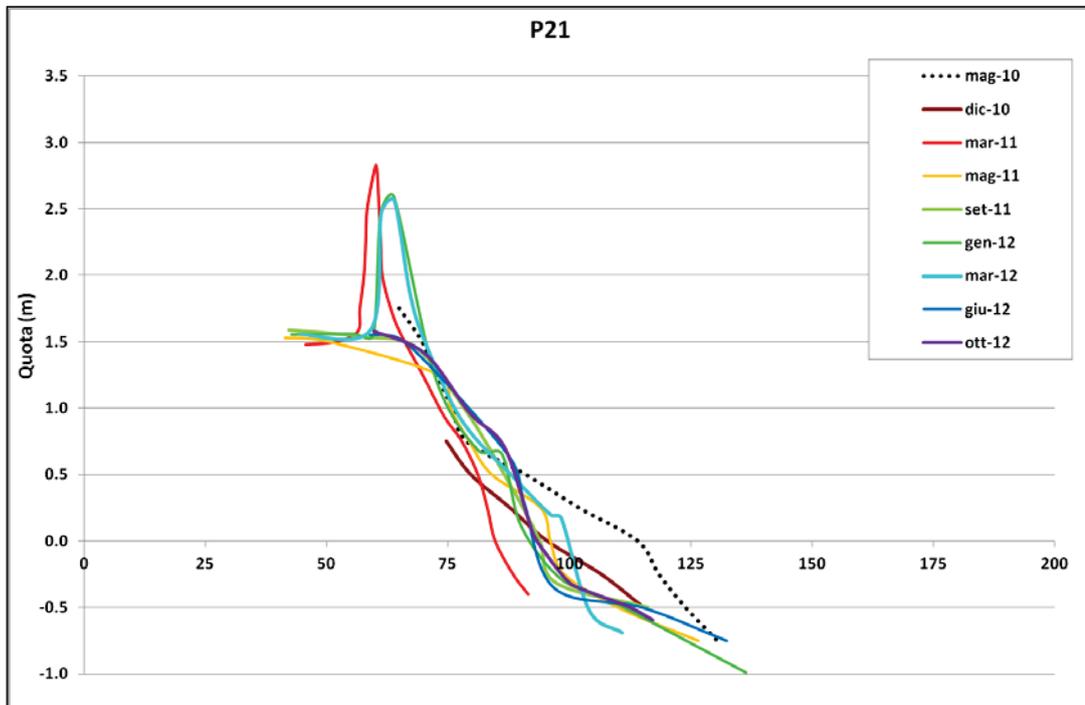


Fig. 8.12 – Variazione topografica del profilo P21 da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

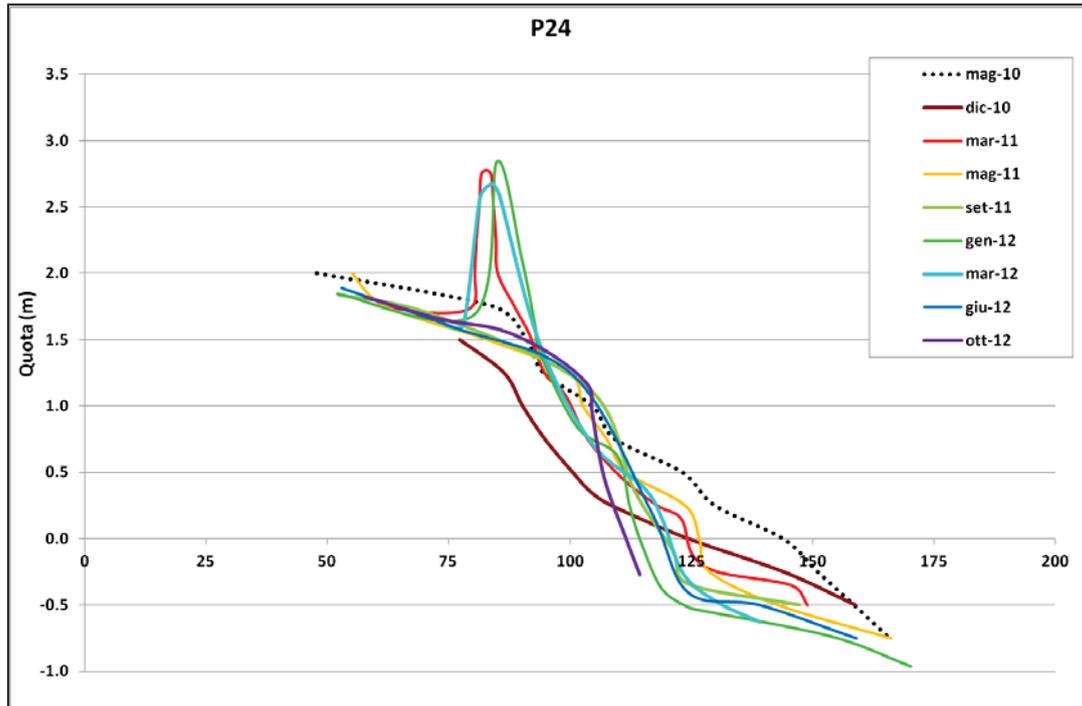


Fig. 8.13 – Variazione topografica del profilo P24 da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

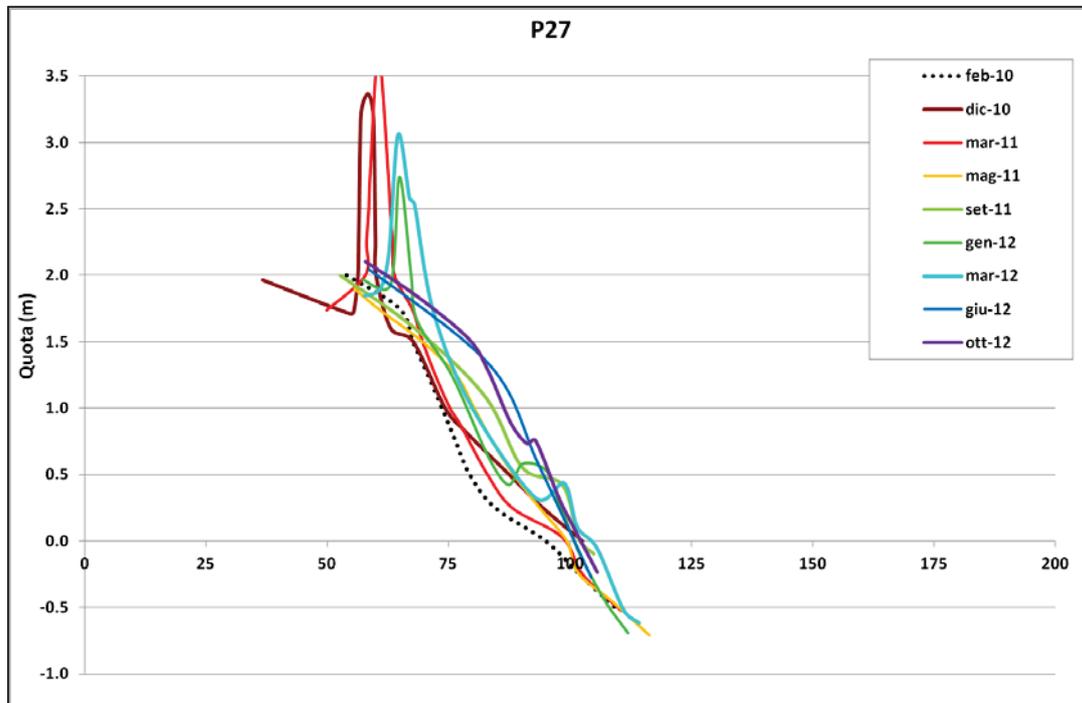


Fig. 8.14 – Variazione topografica del profilo P27 da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

La spiaggia confinata tra i pennelli appartenenti al sistema di difesa a celle ha invece mostrato un comportamento molto differente da quello osservato per il litorale a settentrione appena descritto. Non disponendo in questa zona del rilievo post-intervento, è stato inserito nel confronto il rilievo eseguito nel mese di Febbraio 2010, antecedente l'inizio dei lavori nella zona a Nord. Osservando ad esempio il profilo P27 (Fig. 8.14), che mostra la presenza degli argini invernali, la spiaggia ha registrato un sollevamento delle quote progressivo da Febbraio 2010 ad Ottobre 2012 (+75 cm tra +0,25 e +2 m). Infatti, negli ultimi rilievi, si osserva una spiaggia che assume una morfologia convessa che si raccorda con gli altri profili oltre la linea di riva, la quale è rimasta pressoché costante nel tempo.

### 8.1.2 Evoluzione della spiaggia sommersa

Come per la spiaggia emersa, anche per la spiaggia sommersa sono stati condotti, oltre al rilievo pre-intervento, gli stessi 9 rilievi, a cadenza stagionale, dalla fine dell'intervento (Maggio 2010) al mese di Ottobre 2012. La porzione di fondale indagato, dalla linea di riva alla batimetrica dei 6 m, si estende da 500 m a settentrione dal pennello "ruvido" a 500 m a meridione del primo pennello in massi delle opere a celle. All'interno dell'area delimitata dai due pennelli è stato realizzato l'intervento di ripascimento sommerso e la messa in opera di un *reef* artificiale 6 (Fig. 8.15).

A fine lavori, terminati nel Maggio 2010, il computo volumetrico del materiale versato con il ripascimento ha stimato +127.862 m<sup>3</sup> su un'area di 747.817 m<sup>2</sup> (0,17 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>), calcolato nelle celle 3-4-5-6 (Fig. 8.15).

In particolare, le celle 3 e 5, lato terra e comprensive della zona di intervento, evidenziano un bilancio di +71.325 m<sup>3</sup> (+0,31 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>), mentre le celle 4 e 6, lato mare, un bilancio di circa +56.537 (+0,11 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>).

Il volume di sedimento versato per il ripascimento sommerso è stato stimato essere di circa 41.800 m<sup>3</sup> (83,6 m<sup>3</sup>/m).

In realtà, il quantitativo di materiale versato sul fondale è stato molto maggiore, poiché è stata eseguita una riprofilatura del tratto di appoggio dei moduli del *reef*

artificiale fino al raggiungimento della quota di -2,7 m e sono state colmate alcune zone depresse in prossimità delle opere di difesa. Inoltre, poiché si è verificata una rapida dispersione del materiale durante i lavori a causa delle avverse condizioni marine, il ripascimento sommerso è stato ripetuto più volte.

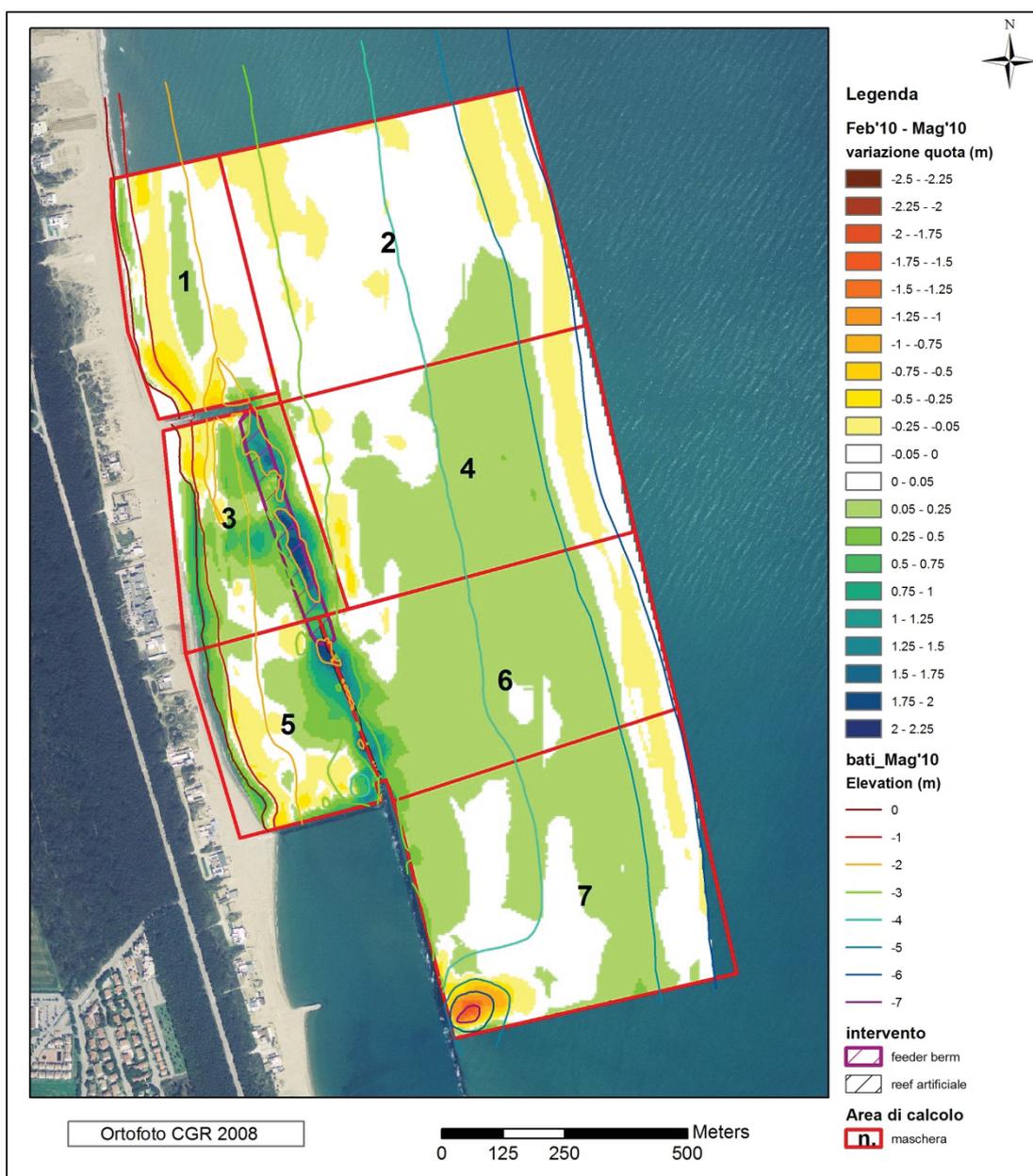


Fig. 8.15 - Mappa delle variazioni in quota riscontrate a fine lavori (Maggio 2010).

Il rilievo eseguito a 29 mesi dalla fine dei lavori, in Ottobre 2012, ha evidenziato importanti variazioni morfologiche.

Come mostra la Fig. 8.16, si osservano aree in erosione, principalmente nelle celle 3 e 5, sia nella zona interessata dal duplice intervento che in prossimità della linea di riva, delle opere in massi e sui fondali oltre le barriere foranee.

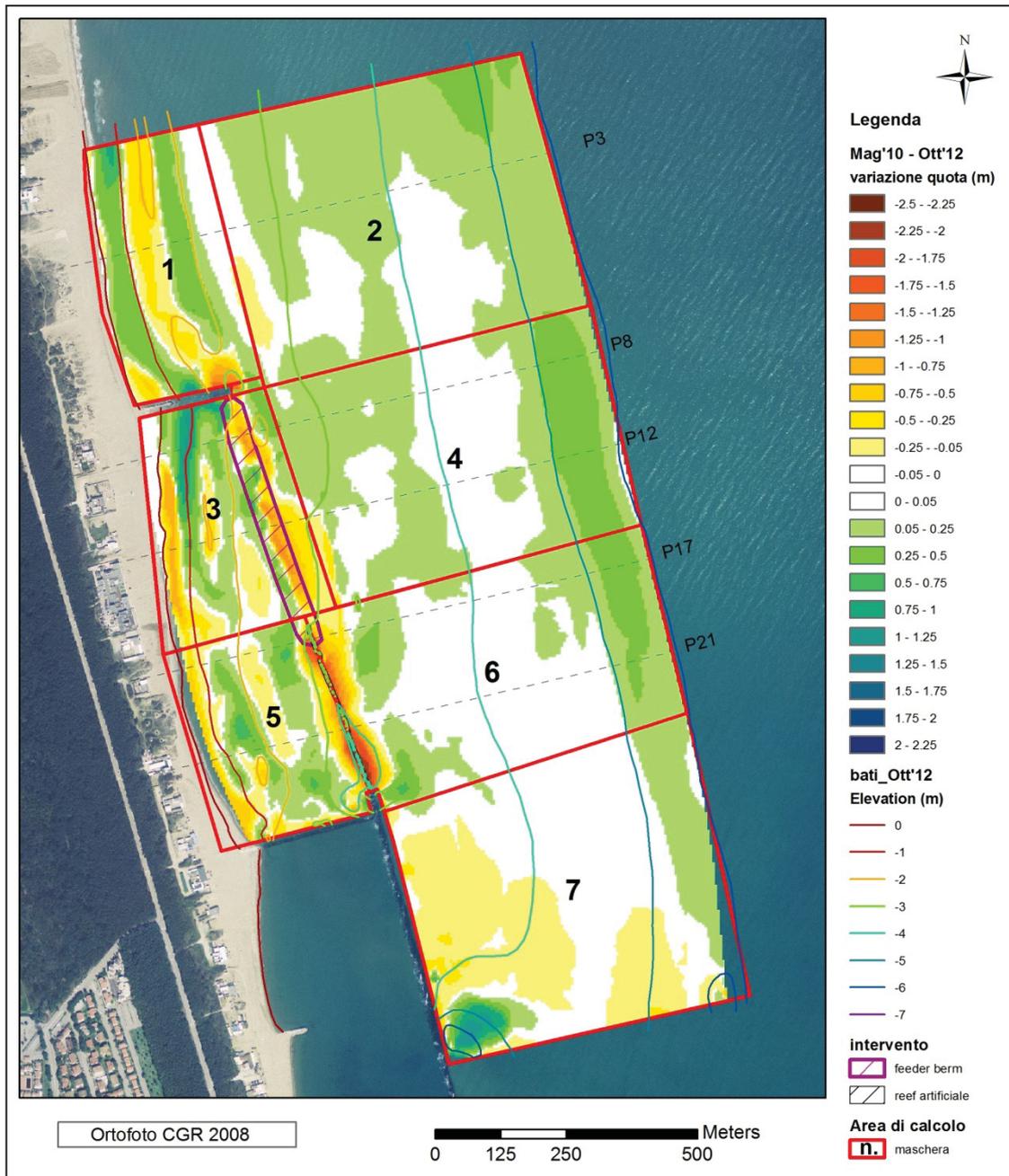


Fig. 8.16 – Mappa delle variazioni in quota riscontrate nell'intero periodo di osservazione, da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

Il bilancio sedimentario per l'intera area di studio dalla fine dei lavori ad Ottobre 2012, trascorsi 29 mesi, è positivo; è stato infatti stimato un accumulo di circa +67.974 m<sup>3</sup> (+0,04 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) (Tab. 8.1). Si ricorda che per ridurre al minimo eventuali errori nella stima delle variazioni, il calcolo è stato eseguito sottraendo dall'ultimo rilievo (Ottobre 2012) il rilievo post-intervento (vedi Cap. § 7.4 per stima errore).

Maggio 2010 - Ottobre 2012		
VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
+67.974	1.519.535	+0,04

Tab. 8.1 – Computo volumetrico per il periodo Maggio 2010 – Ottobre 2012.

In realtà, si osservano aree che hanno registrato una perdita di sedimento, come ad esempio la zona in cui è stato realizzato il ripascimento sommerso e dove è stato messo in opera il *reef* artificiale. I fondali sottocosta, invece, registrano un'alternanza di aree in accumulo e in erosione, disposte in fasce parallele a costa.

La zona del ripascimento sommerso ha registrato un abbassamento delle quote in media di 75 cm e, in alcuni punti, è stato raggiunto anche il metro (Fig. 8.16). In particolare, il ripascimento è stato in gran parte smantellato, mentre i fondali interni hanno registrato dei sollevamenti importanti. Questi accumuli, ubicati tra le profondità di -0,75 e -2 m, hanno assunto una forma allungata e registrano variazioni medie di +50 cm, con punte di circa +1 m, in prossimità del pennello "ruvido". In prossimità della battigia, invece, si osservano degli abbassamenti in media tra i -25 ed i -50 cm. Complessivamente, per la cella 3, è stato computata una perdita di circa -700 m<sup>3</sup> (-0,01 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) dalla fine dei lavori ad Ottobre, per cui può essere considerata stabile.

Per quanto riguarda il tratto interessato dalla presenza del *reef* artificiale, in Fig. 8.16, si osserva un abbassamento dei fondali in corrispondenza della base dei moduli costituenti il *reef*. Tale escavazione, estremamente confinata a ridosso delle strutture, aumenta procedendo da settentrione verso meridione (da -0,7 m ad oltre -2,2 m) e si allarga in direzione *cross-shore* di circa 40-50 m.

La zona in cui è presente la struttura è per metà afferente alla cella 5 e per metà alla cella 6. Considerando la cella 5, comprendente anche i fondali sottocosta, si computa una perdita di circa  $-3.887 \text{ m}^3$ .

Oltre l'area di intervento, verso il largo, si registrano variazioni medie di  $\pm 5 \text{ cm}$ , ma oltre la batimetrica dei  $-4,5 \text{ m}$  si osserva invece un deposito di sedimento che raggiunge anche i  $25 \text{ cm}$ . Andando dunque a computare le variazioni volumetriche delle celle 4 e 6, il bilancio è positivo, con  $+35.385 \text{ m}^3$  di sedimento depositato.

E' interessante confrontare la zona interessata dall'intervento con quella a settentrione del pennello "ruvido" libera da opere di difesa. Anche qui si osserva un'alternanza di aree in accumulo ed aree in erosione dalla linea di riva ai  $-3 \text{ m}$  di profondità, con variazioni in quota intorno a  $\pm 25 \text{ cm}$ .

La cella 1 (entro i  $-3 \text{ m}$  di profondità) e la cella 2 (da  $-3 \text{ m}$  a  $-6 \text{ m}$ ) evidenziano un bilancio sedimentario estremamente positivo, con  $+8.438 \text{ m}^3$  per la cella 1 e  $+29.320 \text{ m}^3$  per la cella 2. Infine i fondali antistanti le barriere foranee in massi, afferenti alla cella 7, mostrano variazioni trascurabili, stimabili in  $-611 \text{ m}^3$  di sedimento asportato.

L'analisi delle variazioni lungo i profili cross-shore della porzione di spiaggia sommersa è stata eseguita mediante l'applicazione del modulo BMAP ed utilizzando la tool "cut & fill"; estendendo lateralmente le variazioni rilevate in corrispondenza del profilo per una distanza pari alla metà di quella intercorrente tra un profilo e l'altro, si è ottenuta la variazione volumetrica.

Osservando nel dettaglio le sezioni topografiche dal profilo P07 al P16, cioè lungo le tracce in corrispondenza del ripascimento sommerso, le variazioni riscontrate per l'intero intervallo temporale (2,5 anni) evidenziano lo smantellamento del ripascimento e un deposito nella porzione di fondale prossima a costa. Anche i fondali più al largo evidenziano un accumulo di sedimento, dove si può osservare la formazione di una barra.

Per quanto riguarda i profili settentrionali, profili P07 e P08 (Fig. 8.17, Fig. 8.18) vicino al pennello "ruvido", si osserva, per un tratto di circa  $90 \text{ m}$ , un bilancio positivo in quanto, sebbene essi abbiano registrato una perdita di circa  $-1.478 \text{ m}^3$  in corrispondenza del ripascimento, evidenziano un deposito di circa  $+7.000 \text{ m}^3$  sui

fondali verso costa e di circa  $+11.788 \text{ m}^3$  su quelli al largo. Il computo evidenzia inoltre una variazione positiva della linea di riva, in media di  $+9,8 \text{ m}$ .

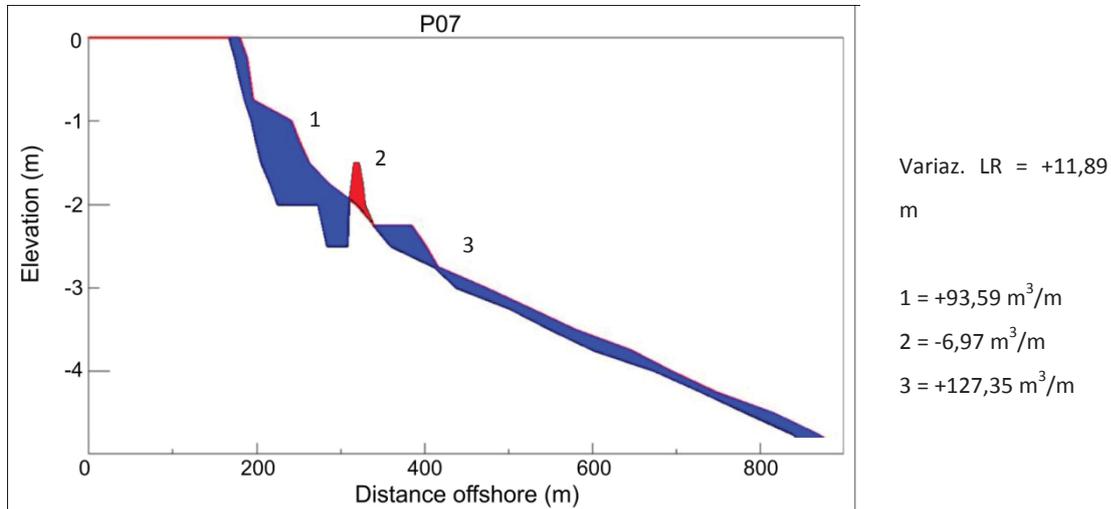


Fig. 8.17 - Erosione/accumulo lungo il profilo P07 calcolato da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

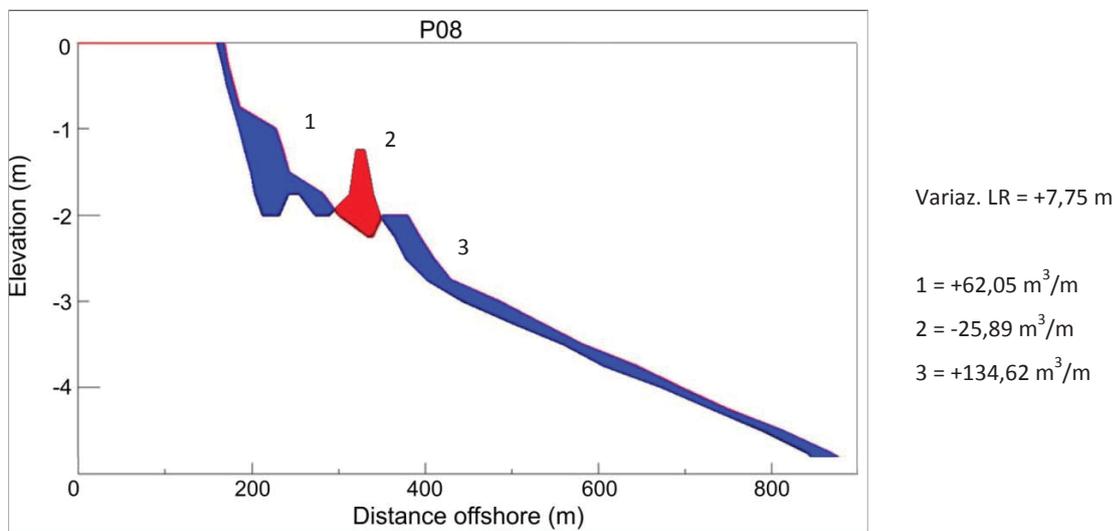


Fig. 8.18 - Erosione/accumulo lungo il profilo P08 calcolato da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

Osservando le variazioni riscontrate sui profili P09, P10, P11 e P12 (Fig. 8.19, Fig. 8.20, Fig. 8.21 e Fig. 8.22), ubicati nel tratto centrale del ripascimento sommerso, si computa un'erosione del versamento di circa  $-4.680 \text{ m}^3$  su un tratto di circa  $180 \text{ m}$ . La

linea di riva, arretrata in media di circa 20 m, ha comportato un'erosione di circa  $-2.538 \text{ m}^3$ , tra le batimetriche di 0 ed 1 m.

I fondali tra -1 e -2,25 hanno registrato al contrario un accumulo di circa  $+7.847 \text{ m}^3$  e quelli oltre i -2,5 m di profondità di circa  $+9.450 \text{ m}^3$ .

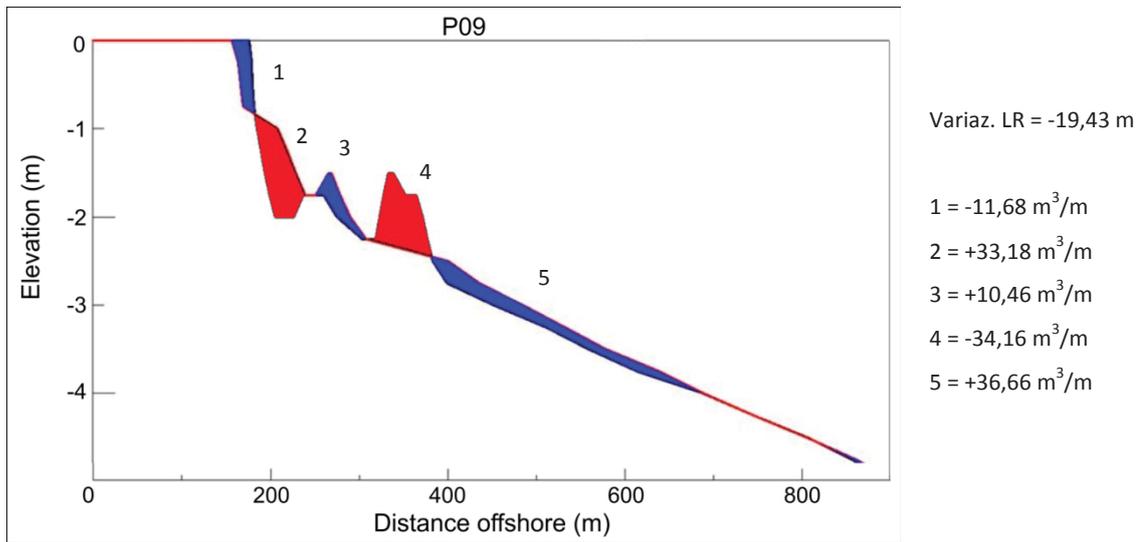


Fig. 8.19 - Erosione/accumulo lungo il profilo P09 calcolato da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

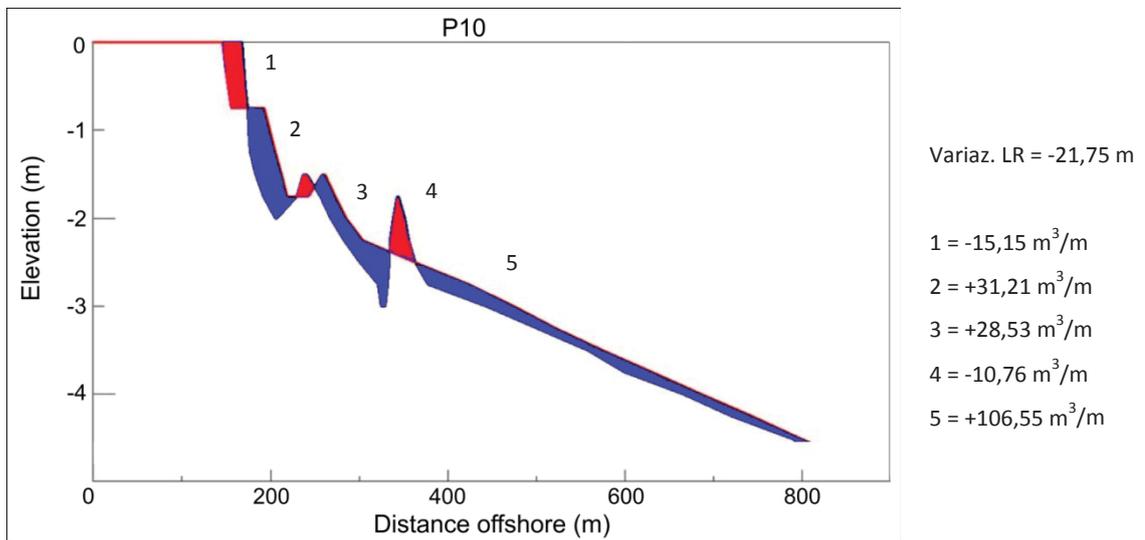


Fig. 8.20 - Erosione/accumulo lungo il profilo P10 calcolato da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

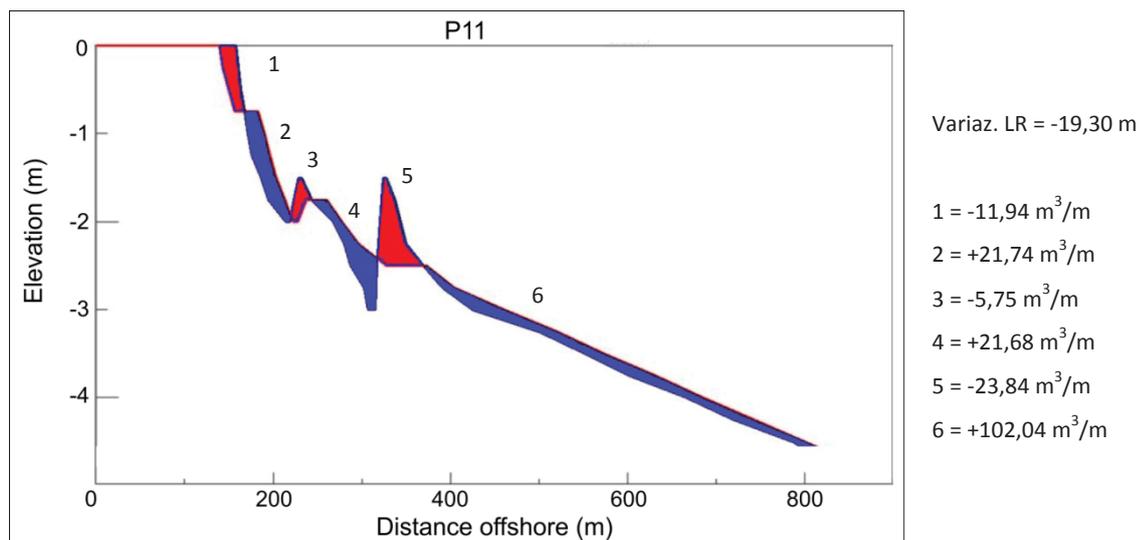


Fig. 8.21 - Erosione/accumulo lungo il profilo P11 calcolato da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

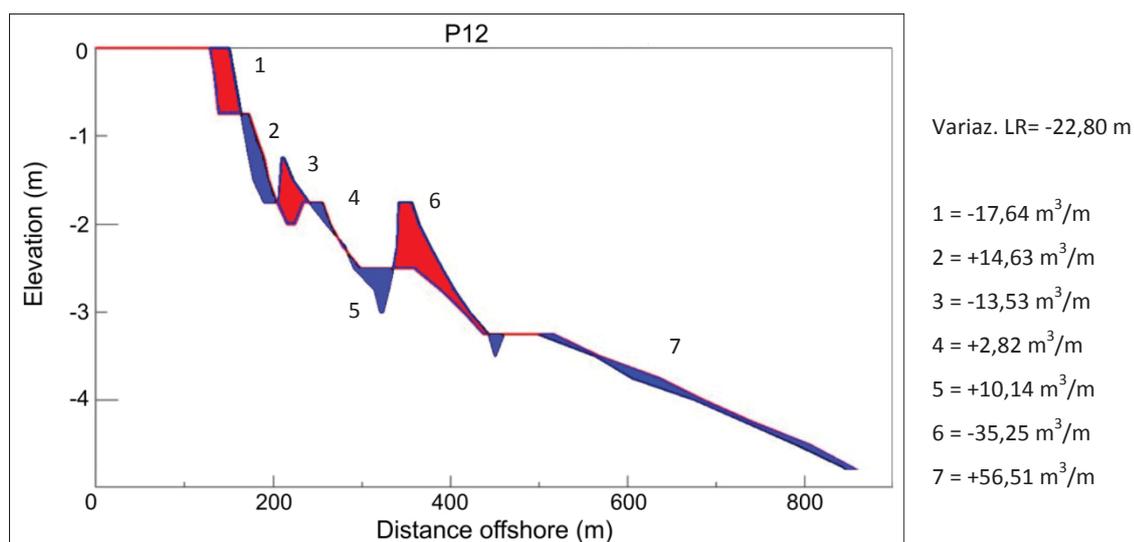


Fig. 8.22 - Erosione/accumulo lungo il profilo P12 calcolato da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

Osservando le variazioni riscontrate sui profili P13, P14 e P15 (Fig. 8.23, Fig. 8.24, Fig. 8.25), su questo tratto lungo circa 135 m si osserva lo stesso trend erosivo manifestato più a Nord, con arretramento di circa 21 m della linea di riva, ed una perdita di circa -2.450 m<sup>3</sup> di sabbia tra la linea di riva e la profondità di 1 m. I fondali tra -1 e -3 m di profondità evidenziano aree alternate in accumulo ed in erosione, con un bilancio comunque positivo (circa +1.780 m<sup>3</sup>). Il ripascimento sommerso evidenzia una

parziale erosione del ripascimento con la perdita di circa  $-5.401 \text{ m}^3$  di sabbia. I fondali al largo mostrano un deposito stimabile di circa  $+8.483 \text{ m}^3$ .

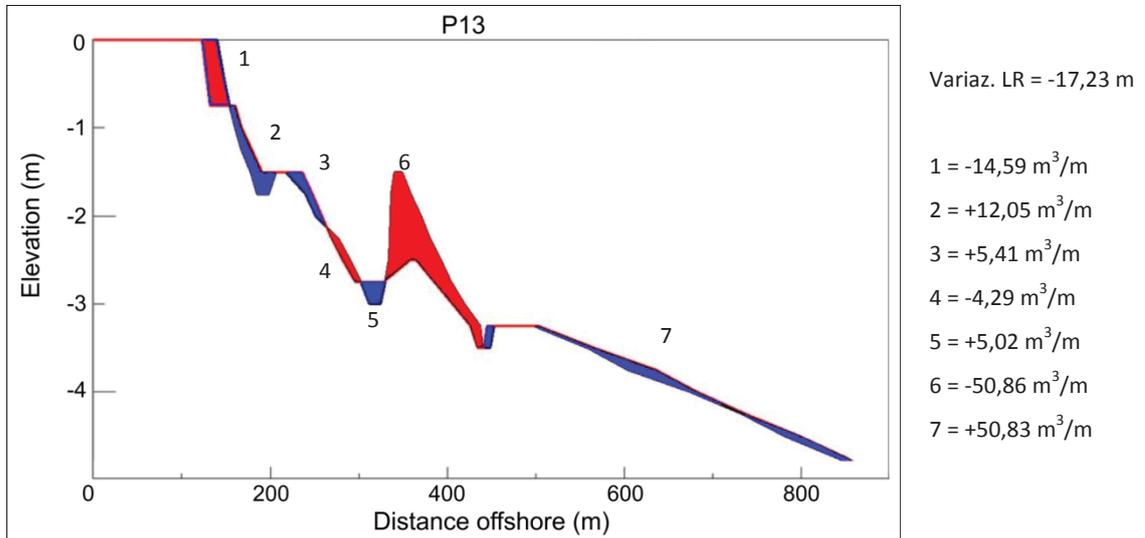


Fig. 8.23 - Erosione/accumulo lungo il profilo P13 calcolato da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

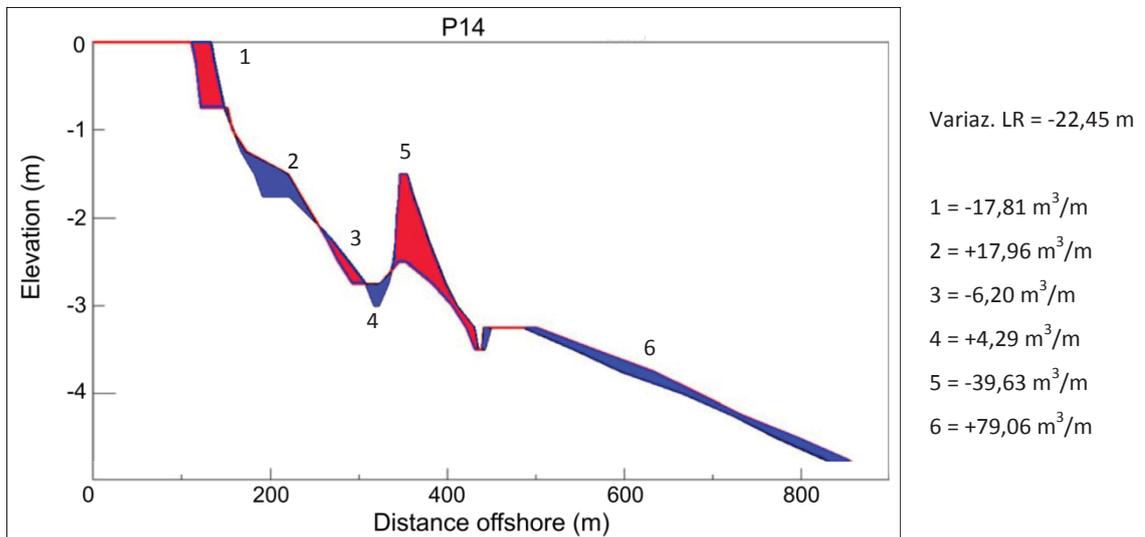


Fig. 8.24 - Erosione/accumulo lungo il profilo P14 calcolato da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

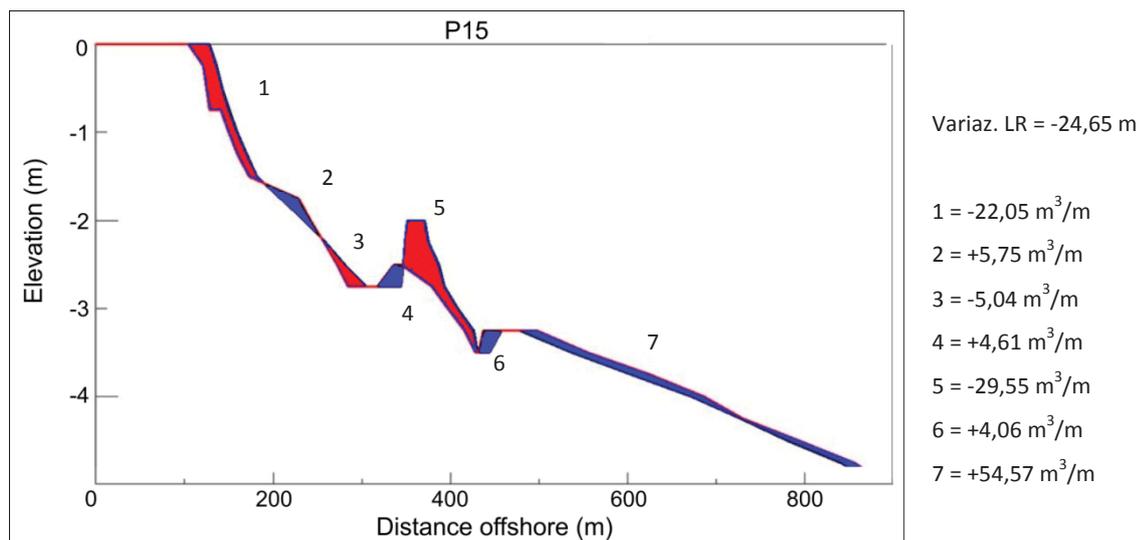


Fig. 8.25 - Erosione/accumulo lungo il profilo P15 calcolato da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

Il dato senz'altro interessante riscontrato alla fine dei 29 mesi è dato dalla presenza di morfologie di barre, le cui caratteristiche variano nei vari profili rilevati (Fig. 8.26). Per i profili P07 e P08 la sua posizione è intorno ai 200 m da costa, ha un'altezza di circa 0,4 m e la base, ampia in media 90 m, è ubicata tra la profondità di -2,5 m. La sua morfologia, più piatta e simmetrica nel P07, diventa trapezoidale e asimmetrica nel P08, con il lato verso costa più ripido.

Procedendo verso Sud, il P09 ed il P10 evidenziano la presenza di una barra più vicina a costa, a circa 110 m da riva, molto appuntita e asimmetrica, la cui altezza è di circa 0,45 m e la base, larga in media 85 m è ubicata alla profondità di -2 m. Tale barra è rilevata anche nei profili più a Sud (P11 e P12), ma compare più al largo un'ondulazione del fondale che ancora più a Sud (P13, P14 e P15) diventa una seconda barra, a circa 325 m di distanza da costa e a circa 90-100 m di distanza dalla barra interna. Mentre la barra interna ha un'altezza in media di 0,5 m e una base, larga in media 120 m, alla profondità di circa -3 m, la barra esterna, più piatta e larga, ha un'altezza inferiore (circa 0,35-0,40 m) e una base molto più ampia (circa 150 m) intorno ai -3,5 m di profondità.

Sono stati riportati anche i profili a Nord e a Sud dell'area interessata dal ripascimento sommerso, in quanto anche qui si è osservata la presenza di barre.

In particolare, a Nord del pennello “ruvido”, il P03 (linea verde, Fig. 8.26) mostra la presenza di una barra a circa 150 m da costa, alta circa 0,6 m, la cui cresta si attesta alla profondità di circa -1,5 m.

Più a Sud, in corrispondenza della zona di realizzazione del *Tecnoreef*, si osserva la presenza di altre barre: sia al largo, oltre i 300 m da costa (P18), che sottocosta, entro i 180 m di distanza da riva, con la cresta a profondità inferiori ai -2,5 m (P18, P20, P22).

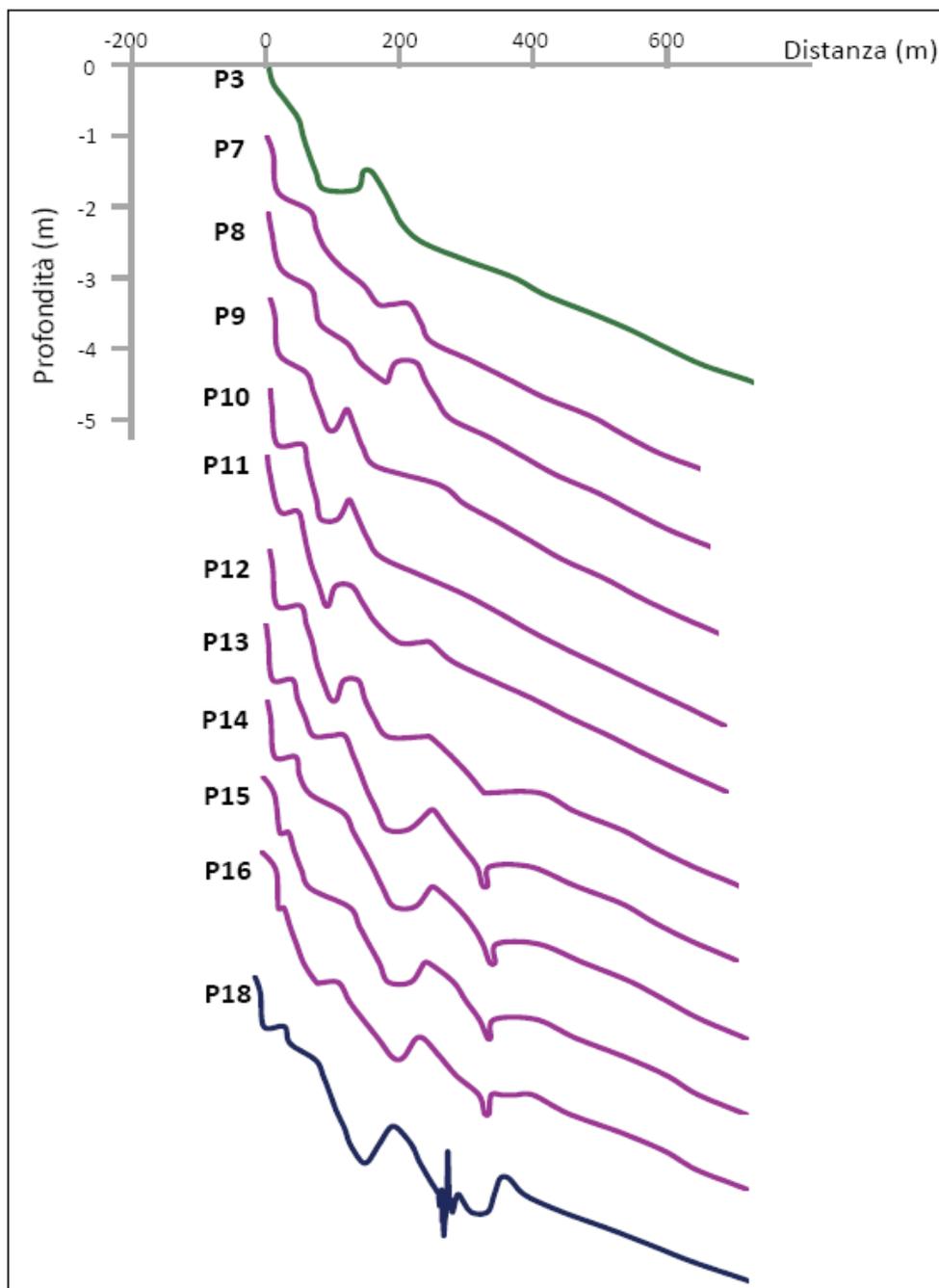


Fig. 8.26 – Morfologia rilevata lungo i profili cross-shore nel rilievo di Ottobre 2012.

### *8.1.2.1 Analisi di dettaglio dell'evoluzione della spiaggia sommersa*

---

I dati ottenuti dagli 8 rilievi eseguiti dopo la fine dell'intervento sono stati analizzati nel dettaglio ed è stato effettuato un ulteriore computo volumetrico *step by step* delle variazioni occorse per ognuna delle 7 celle in cui è stata suddivisa l'area di studio. Questa scelta è legata sia alla volontà di poter scomporre l'evoluzione morfologica osservata in funzione della presenza od assenza di difese costiere e del tipo di difesa presente sia alla necessità di individuare in quale periodo si sono verificate variazioni significative e di tentare di comprenderne le cause. Per fare ciò è stata inoltre eseguita un'analisi di dettaglio dei profili elaborati per ogni singolo rilievo su tutti i transetti (Appendice B). Le tavole relative all'elaborazione delle mappe batimetriche dei singoli rilievi sono riportate in appendice A.

Di seguito vengono riportate le mappe delle variazioni in quota per ogni intervallo temporale intercorso tra un rilievo ed il successivo:

- Maggio 2010 (fine intervento) – Dicembre 2010
- Dicembre 2010 – Marzo 2011
- Marzo 2011 – Maggio 2011
- Maggio 2011 – Settembre 2011
- Settembre 2011 – Gennaio 2012
- Gennaio 2012 – Marzo 2012
- Marzo 2012 – Giugno 2012
- Giugno 2012 – Ottobre 2012.

Preme comunque ricordare che, per quanto riguarda le stime sulle variazioni volumetriche intercorse tra un rilievo ed il successivo, l'errore commesso è centimetrico (in quota). L'area che racchiude il TIN relativamente ad ogni cella non è costante e pertanto i volumi computati hanno un valore che può essere considerato corretto per il singolo confronto (vedi Cap. 7.4).

**Maggio 2010 (fine intervento) – Dicembre 2010**

Il confronto dei rilievi eseguiti a Maggio e a Dicembre 2010 (Fig. 8.27) mette in evidenza un bilancio complessivo negativo, il quale era chiaramente atteso in quanto i materiali appena versati, non trovandosi in equilibrio con il sistema tendono a spostarsi per acquisire una configurazione più stabile.

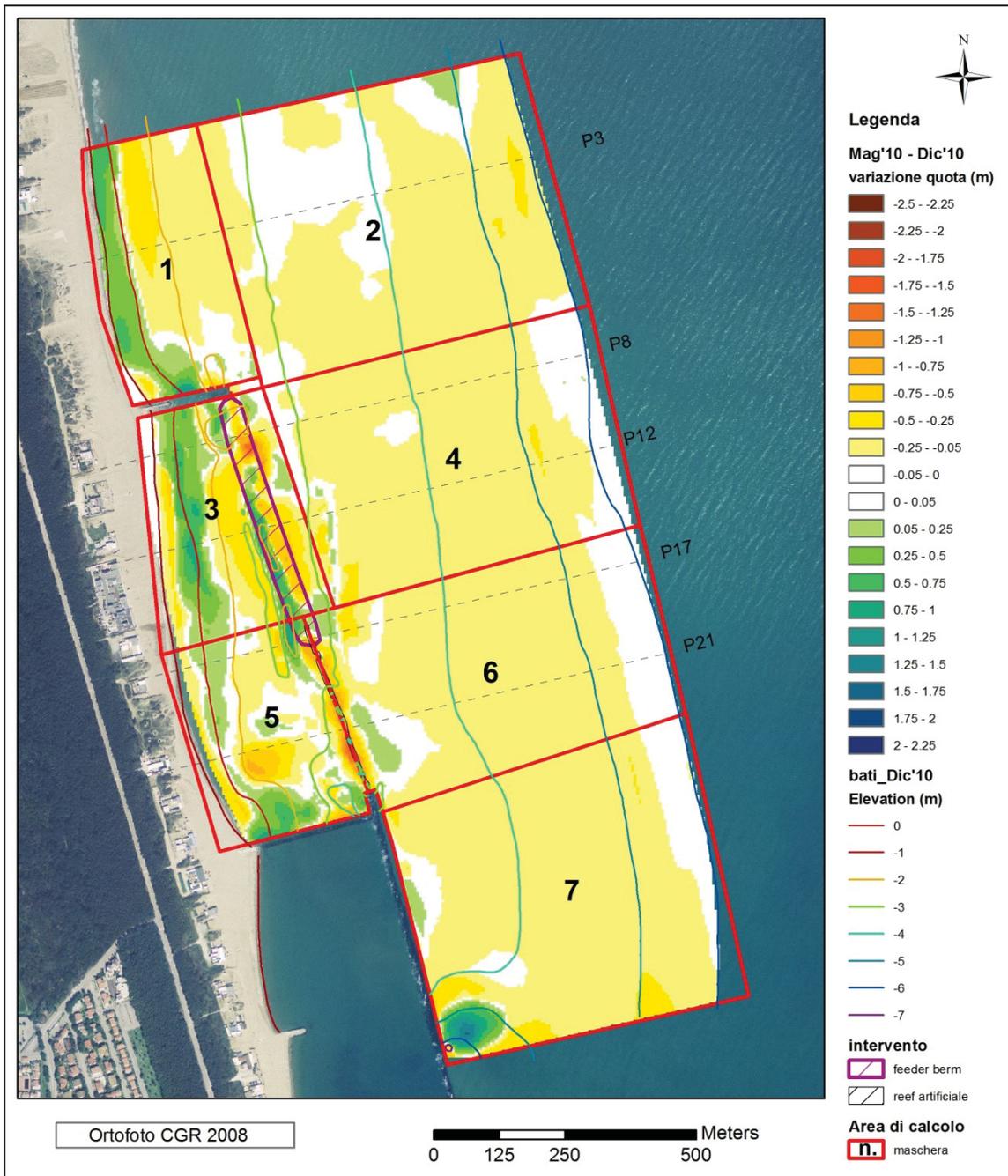


Fig. 8.27 - Mappa delle variazioni in quota riscontrate da Maggio 2010 a Dicembre 2010.

La zona indagata evidenzia una prevalenza di variazioni negative: i sedimenti asportati sembrano essersi depositati nei fondali più prossimi alla costa. Per quanto riguarda la cella 1, in particolare, i sedimenti si sono depositati in prossimità della linea di riva (Fig. 8.28), mentre in corrispondenza del ripascimento sommerso (cella 3) il sedimento si è depositato attorno alla batimetrica di 1 m (Fig. 8.29 e Fig. 8.30); inoltre si nota un lieve spostamento del materiale in direzione sud.

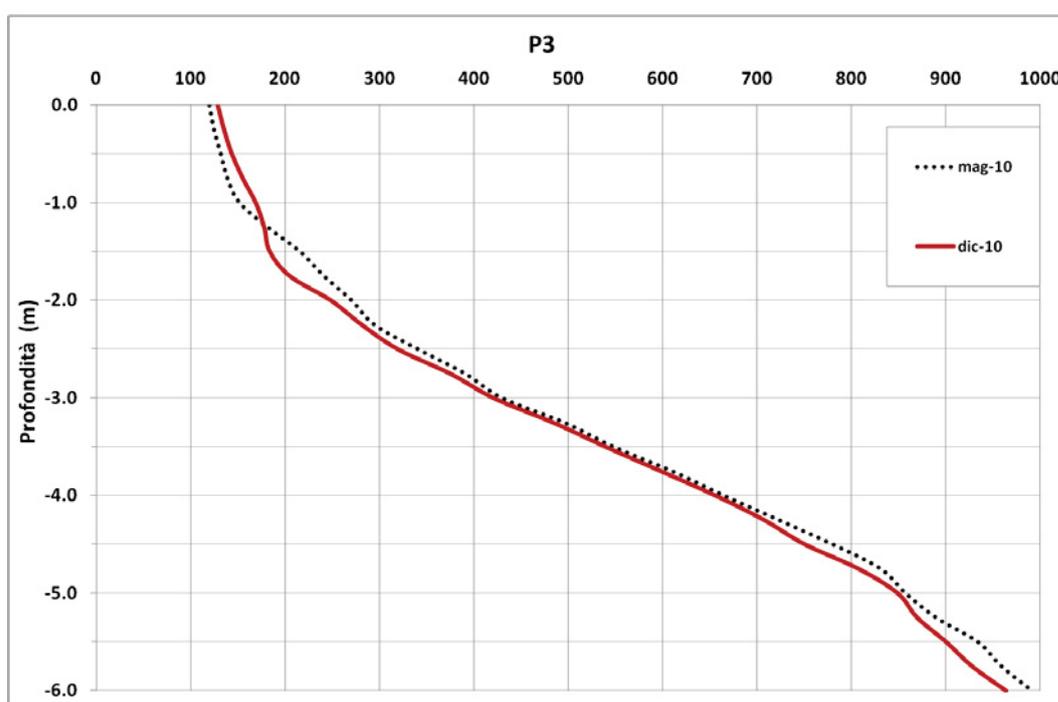


Fig. 8.28 - Profilo P03 riportante il confronto tra il rilievo di Maggio 2010 e quello di Dicembre 2010.

Anche la zona occupata dal *reef* ha subito un'esportazione dei materiali, non solo nell'area sottostante le strutture, ma anche nel loro intorno (tra le celle 5 e 6). Si osservano accumuli di sedimento nella zona sottocosta a ridosso del primo pennello del sistema di difese rigide subito a sud, comportando un sollevamento relativo delle quote fino a 0,5 -0,75 m (cella 5). Si osserva inoltre un'area, attorno alla batimetrica dei 2 - 2,5 m, in posizione più o meno centrale della cella 5, in cui si è verificato un abbassamento dei fondali (Fig. 8.31, Fig. 8.32). In corrispondenza del lato verso mare del reef (cella 6) si è creata una seppur lieve deposizione di materiale estesa in senso parallelo alla barriera con un sollevamento delle quote mediamente di 0,10 -0,25.

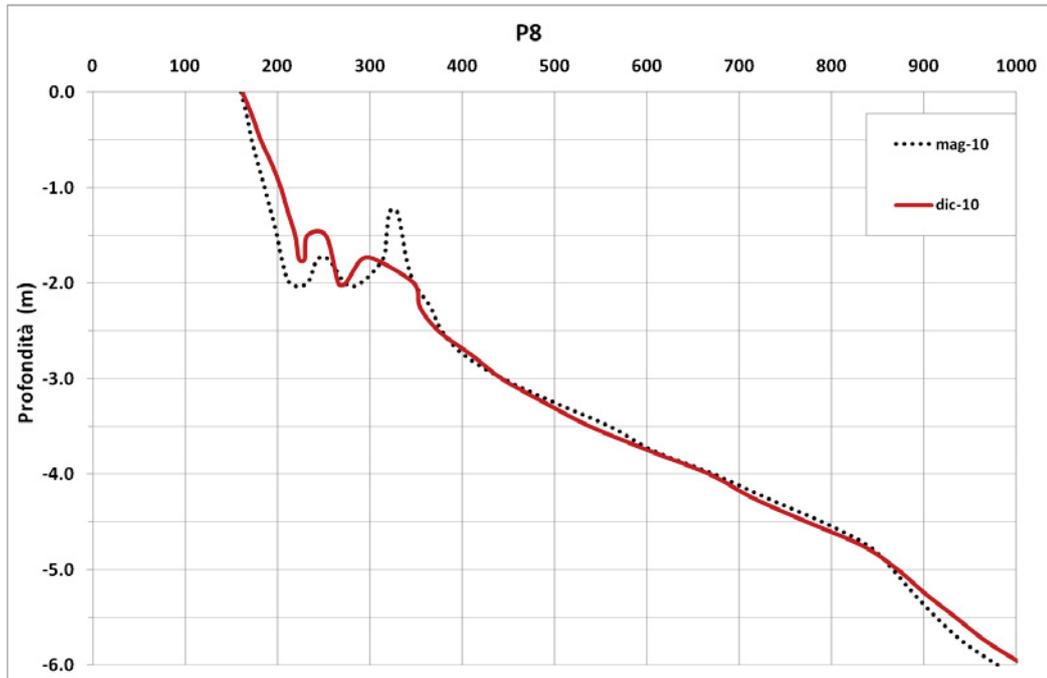


Fig. 8.29 - Profilo P08 riportante il confronto tra il rilievo di Maggio 2010 e quello di Dicembre 2010.

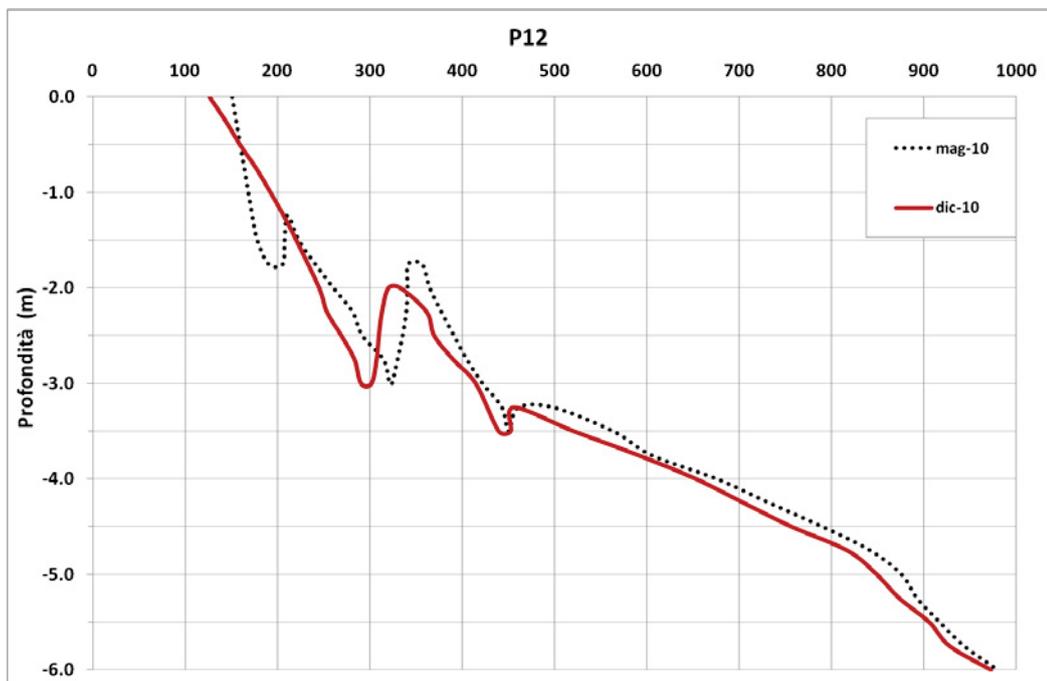


Fig. 8.30 - Profilo P12 riportante il confronto tra il rilievo di Maggio 2010 e quello di Dicembre 2010.

I fondali tra la batimetria dei 3 m e dei 5 m (celle 2, 4, 6 e 7) registrano altresì un trend erosivo con abbassamenti di quota che comunque non superano i 25 cm. Nella

zona di intersezione del ripascimento sommerso e della struttura in reef artificiali si osserva invece un sollevamento delle quote del fondale sino a 0,75 m, sebbene leggermente spostata verso costa rispetto all'asse mediano dei due interventi eseguiti.

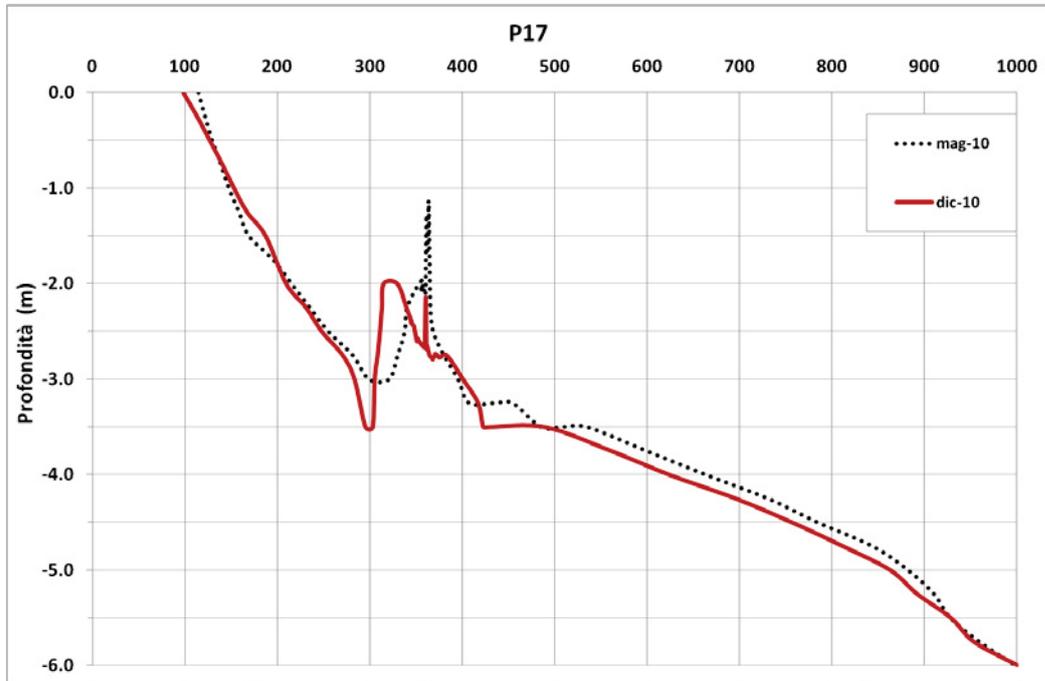


Fig. 8.31 - Profilo P17 riportante il confronto tra il rilievo di Maggio 2010 e quello di Dicembre 2010.

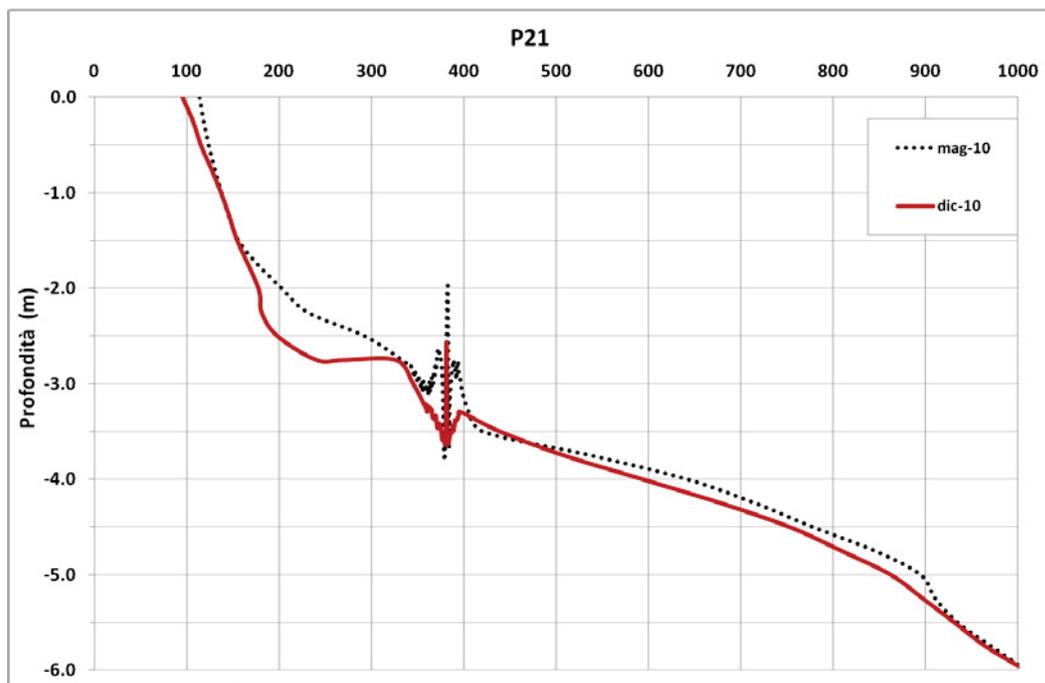


Fig. 8.32 - Profilo P21 riportante il confronto tra il rilievo di Maggio 2010 e quello di Dicembre 2010.

Dal computo volumetrico eseguito tra i due TIN considerati (§ Appendice A) si stima che in questo periodo vi sia stata un'erosione di oltre 127.000 m<sup>3</sup> (-0,09 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) (Tab. 8.2).

Maggio 2010 - Dicembre 2010		
VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
-127.038	1.474.344	-0,09

Tab. 8.2 - Computo volumetrico per il periodo Maggio 2010 – Dicembre 2010.

Le maggiori perdite si sono verificate al largo (celle 2, 4, 6, Tab. 8.3), mentre i maggiori depositi si sono verificati nella zona libera da opere di difesa a settentrione del pennello "ruvido" (cella 1) e nel tratto verso costa interessato dal ripascimento sommerso (cella 3).

Maggio 2010 - Dicembre 2010								
Celle		1	2	3	4	5	6	7
<b>TOTALE</b>	m <sup>3</sup>	+19	-28.667	-1.164	-28.028	-6.366	-29.143	-33.690
	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,00	-0,09	-0,01	-0,11	-0,06	-0,12	-0,11

Tab. 8.3 - Computo volumetrico per il periodo Maggio 2010 – Dicembre 2010, suddiviso per celle.

**Dicembre 2010 – Marzo 2011**

Dalla mappa delle variazioni volumetriche in Fig. 8.33 si osserva che nel tratto a nord del pennello “ruvido” non si verificano variazioni in quota superiori ai 10 cm nell’area esterna alla batimetrica dei 2 m (cella 2).

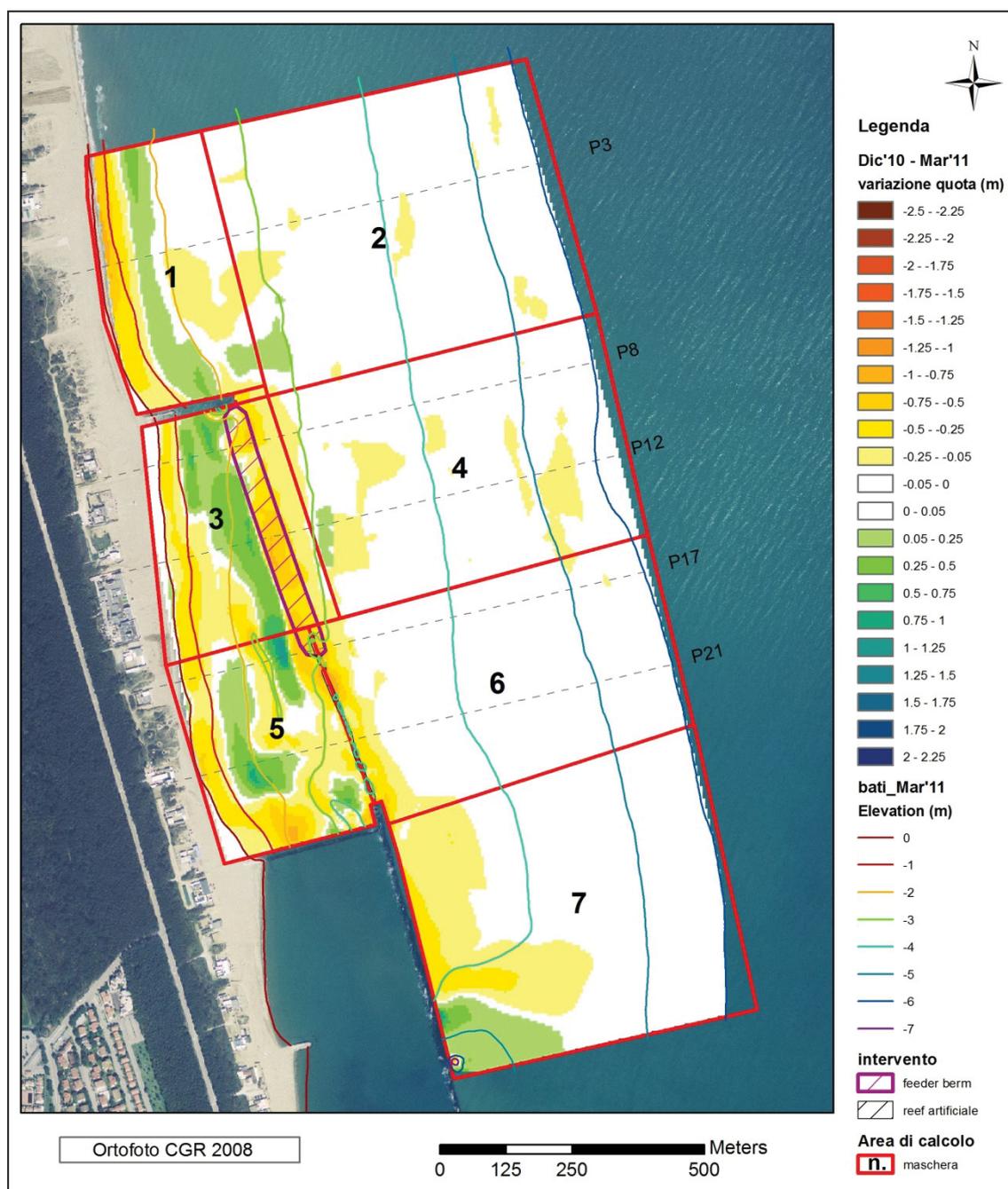


Fig. 8.33 - Mappa delle variazioni in quota riscontrate da Dicembre 2010 a Marzo 2011.

Il tratto sotto costa (cella 1), invece, è caratterizzato da una zona in erosione dalla linea di riva fino alla -1,25 m con abbassamenti medi di circa 50 cm, ed una stretta zona in sollevamento compresa tra le profondità di -1,25 e -1,75 m, con variazioni di circa +25 cm (Fig. 8.34).

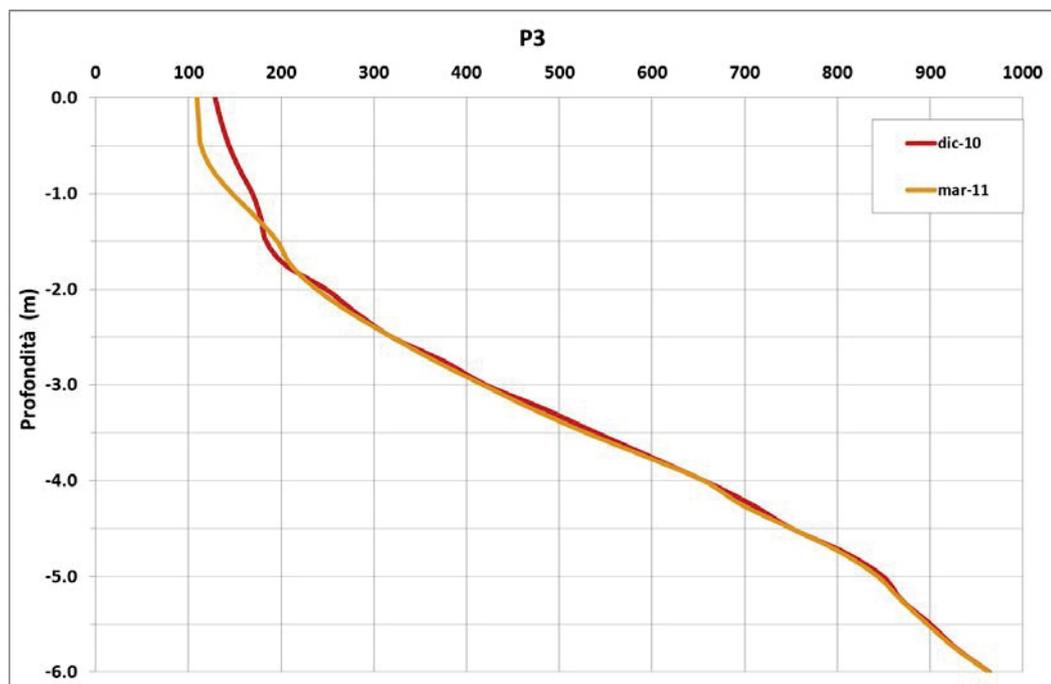


Fig. 8.34 - Profilo P03 riportante il confronto tra il rilievo di Dicembre 2010 e quello di Marzo 2011.

Nella cella 3, subito a meridione del pennello “ruvido”, si osserva una zona in accumulo, con innalzamenti di quota di circa 50 cm, mentre l’area in cui è stato realizzato il ripascimento sommerso subisce un’erosione con abbassamenti delle quote di circa -0,5 – -0,75 m ed i fondali dietro il ripascimento si sollevano in media di 50-70 cm. Al largo, nella cella 4 così come nella 6, non si rilevano variazioni importanti.

Il fondale su cui poggia il *reef* e nel suo intorno, si continua a registrare un trend erosivo, con abbassamenti medi di -0,75 – -1 m. Da evidenziare come, in entrambe le celle verso costa (3 e 5), il fondale attorno alla batimetrica di 0,5 m risulta in erosione con perdite in quota tra i -0,25 ed i -0,5 m (Fig. 8.35, Fig. 8.36, Fig. 8.37, Fig. 8.38), così come l’area a ridosso del primo trasversale delle opere in massi più a sud, la quale è caratterizzata da un abbassamento di circa -0,75 m. In generale comunque fondali

verso costa di queste due celle (celle 3 e 5) evidenziano alternanze di aree in accumulo ed in erosione: infatti subito oltre la zona prossima a costa in erosione, tra -1,25 e -2,25 m di profondità, si rileva una zona in sollevamento di circa +0,5 m.

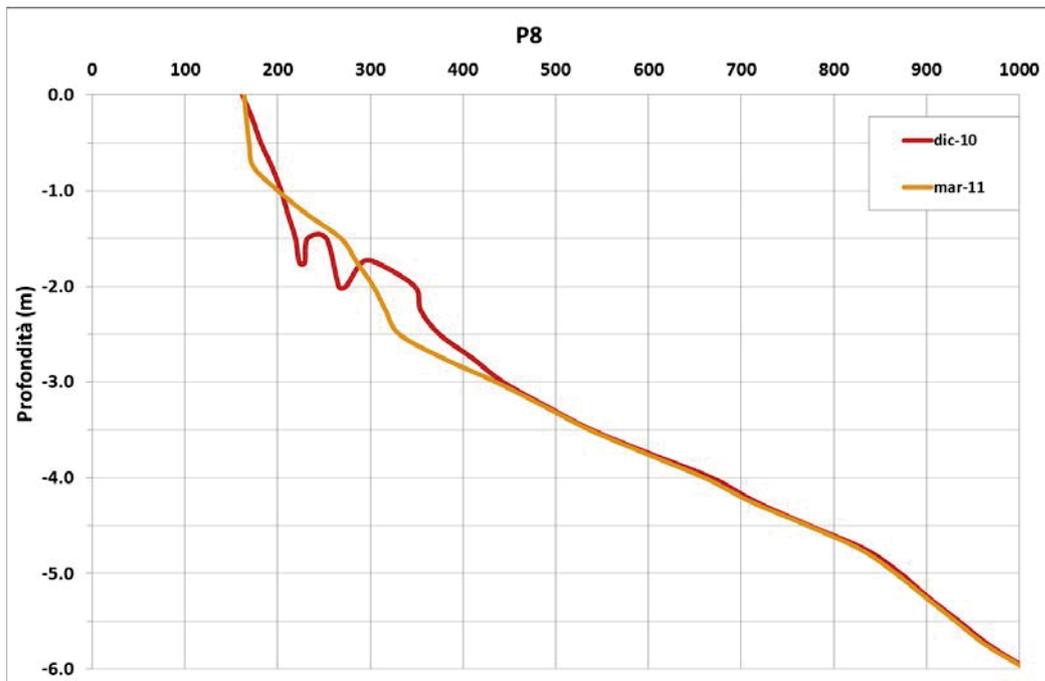


Fig. 8.35 - Profilo P08 riportante il confronto tra il rilievo di Dicembre 2010 e quello di Marzo 2011.

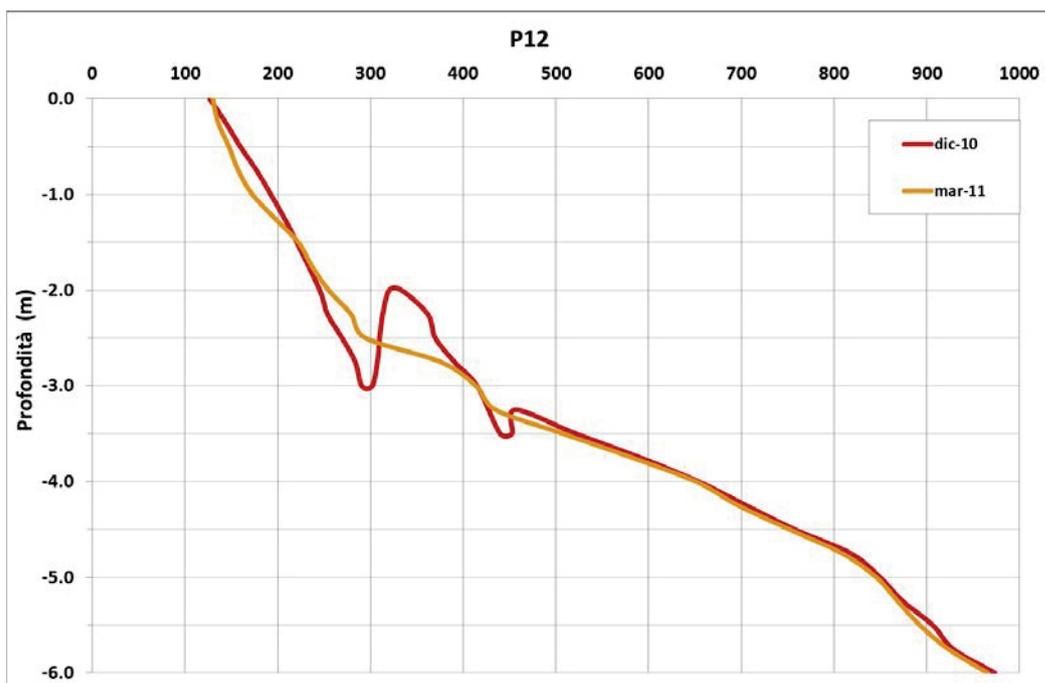


Fig. 8.36 - Profilo P12 riportante il confronto tra il rilievo di Dicembre 2010 e quello di Marzo 2011.

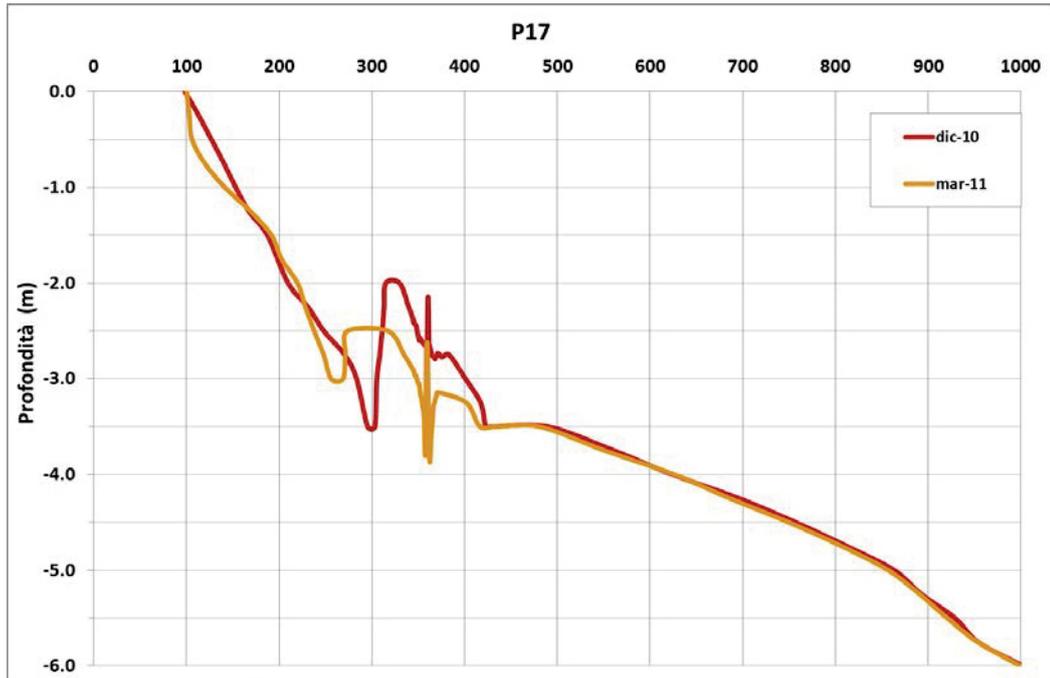


Fig. 8.37 - Profilo P17 riportante il confronto tra il rilievo di Dicembre 2010 e quello di Marzo 2011.

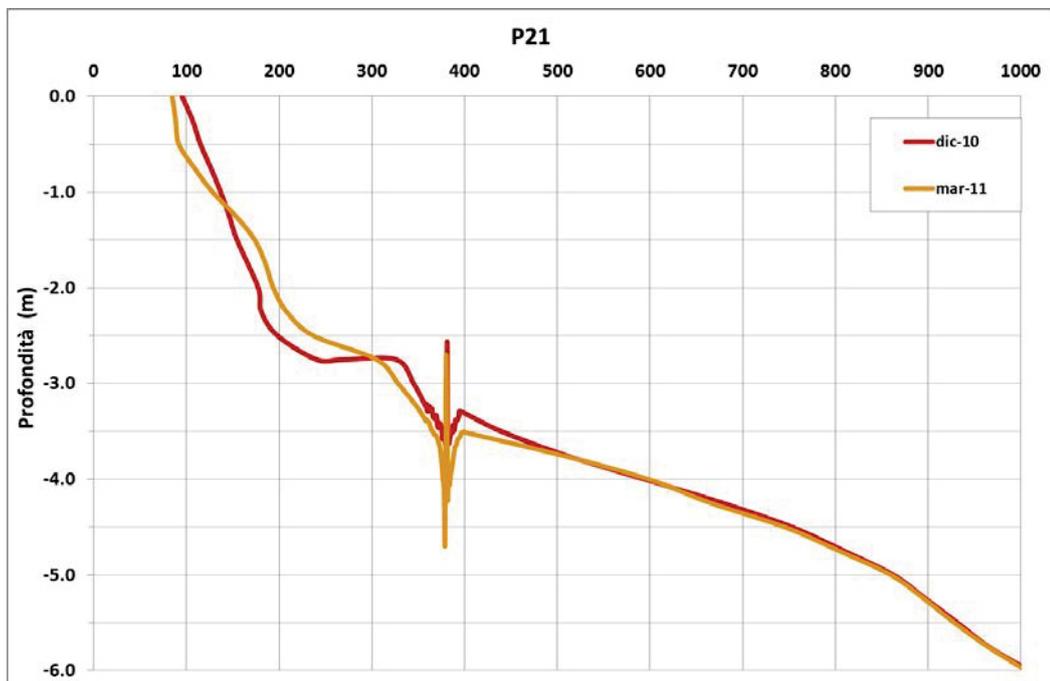


Fig. 8.38 - Profilo P21 riportante il confronto tra il rilievo di Dicembre 2010 e quello di Marzo 2011.

I fondali dietro al *reef* presentano di nuovo fenomeni erosivi, in media di -25 cm. Al largo della struttura (cella 6), oltre la batimetria dei 3,5 m, non si rilevano particolari

variazioni di quota. Infine, in corrispondenza delle barriere longitudinali in massi (cella 7), si osserva un approfondimento dei fondali di circa -0,25 m in prossimità delle opere, mentre verso il largo le variazioni sono trascurabili.

Dal computo volumetrico eseguito tra i due TIN relativi al rilievo di Dicembre 2010 ed il rilievo di Marzo 2011 (§ Appendice A) si stima che vi sia stata una perdita di oltre -92.592 m<sup>3</sup> di materiale in un'area di oltre 1,1 milioni di m<sup>2</sup> (-0,08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>), rapportata con un guadagno di oltre 40.000 m<sup>3</sup> di sedimento in un'area di 257.457 m<sup>2</sup> (+0,16 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>). Complessivamente si stima un bilancio sedimentario negativo con -51.964 m<sup>3</sup> di sedimento in meno (Tab. 8.4), in cui la maggior parte delle variazioni si sono riscontrate entro i -3,5 m di profondità.

Dicembre 2010 - Marzo 2011		
VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
-51.964	1.484.610	-0,04

Tab. 8.4 - Computo volumetrico per il periodo Dicembre 2010 – Marzo 2011.

Se si osservano i bilanci volumetrici nelle varie celle in questi mesi invernali (Tab. 8.5), tutte hanno registrato un valore negativo, ad eccezione della cella 5, che risulta grosso modo stabile. Le celle in cui si è verificata la perdita maggiore sono quella verso costa in corrispondenza del ripascimento sommerso (cella 3) e quella verso il largo in corrispondenza del reef artificiale (cella 6), dove il materiale eroso è stato complessivamente di oltre -22.000 m<sup>3</sup>. Al contrario del periodo precedente, anche le celle 1 e 2, ubicate nel tratto costiero libero da opere, hanno mostrato segnali erosivi, con una perdita di circa -13.000 m<sup>3</sup> (Tab. 8.5).

Dicembre 2010 - Marzo 2011								
Celle	1	2	3	4	5	6	7	
	m <sup>3</sup>	-7.080	-6.188	-11.205	-7.810	+309	-11.122	-8.866
TOTALE	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	-0,06	-0,02	-0,09	-0,03	0,00	-0,05	-0,03

Tab. 8.5 - Computo volumetrico per il periodo Dicembre 2010 – Marzo 2011, suddiviso per celle.

**Marzo 2011 – Maggio 2011**

Nella mappa delle variazioni volumetriche riscontrate nella primavera 2011 (Fig. 8.39) si osservano trend differenti rispetto ai mesi precedenti.

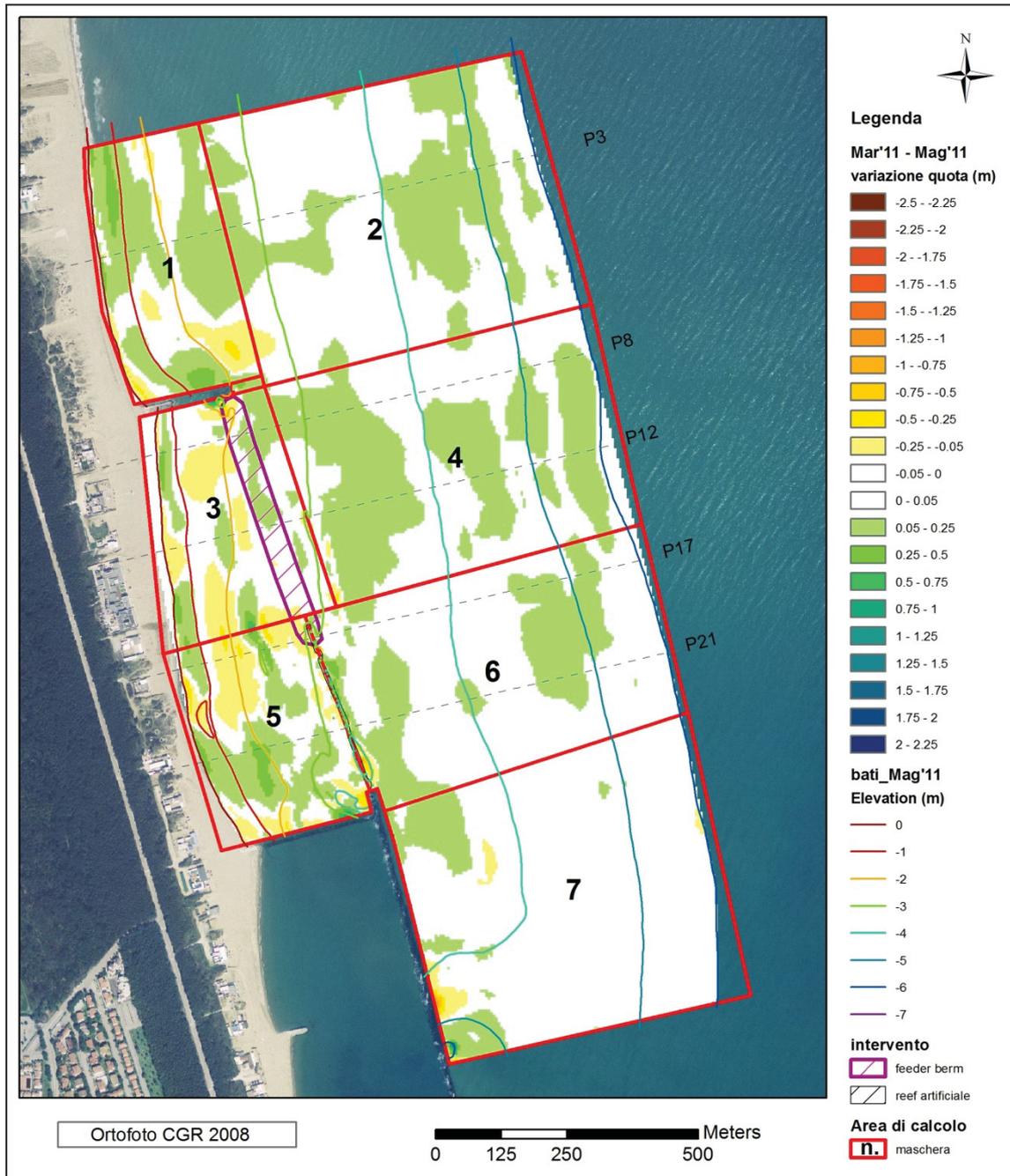


Fig. 8.39 - Mappa delle variazioni in quota riscontrate da Marzo 2011 a Maggio 2011.

Il tratto a settentrione del pennello "ruvido" (cella 2) non presenta variazioni importanti al largo della batimetrica di 3 m. Sottocosta, invece (cella 1), attorno alla -0,75 m, si osserva un accumulo di circa +0,4 m di forma allungata e parallelo a riva (Fig. 8.40). Nella zona limitrofa al pennello "ruvido" si registrano delle variazioni positive attorno a +30 cm.

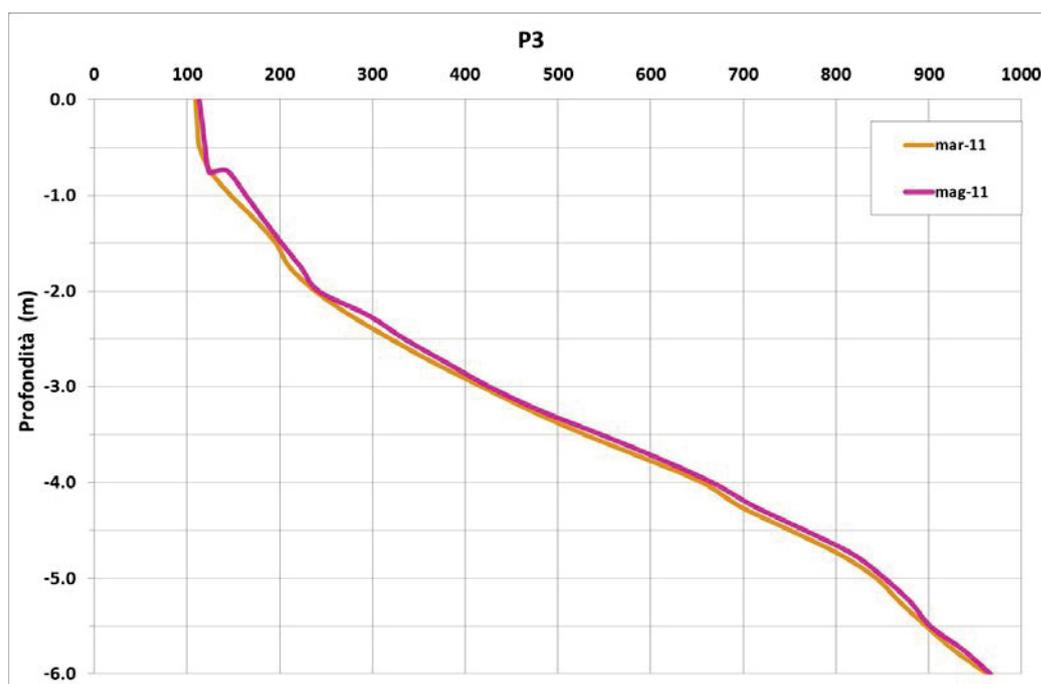


Fig. 8.40 - Profilo P03 riportante il confronto tra il rilievo di Marzo 2011 e quello di Maggio 2011.

L'area racchiusa dalla cella 3, interessata dal ripascimento sommerso, non presenta particolari variazioni, con alternanze di valore opposto rispetto al periodo precedentemente analizzato, di piccole zone in accumulo ed altre ancor più piccole in erosione, con variazioni comunque entro i 25 cm (Fig. 8.41, Fig. 8.42). Anche la cella 5, dietro al reef artificiale, mostra un'alternanza di aree di deposito ed altre di erosione, in cui si evidenzia la presenza di un accumulo sabbioso alla profondità di -2,5 m lungo circa 130 m con un'altezza media di 0,3 m, in parte compreso nella cella 3. Sia verso costa che verso il largo rispetto a tale accumulo, si osservano due zone in abbassamento (-10 - -15 cm).

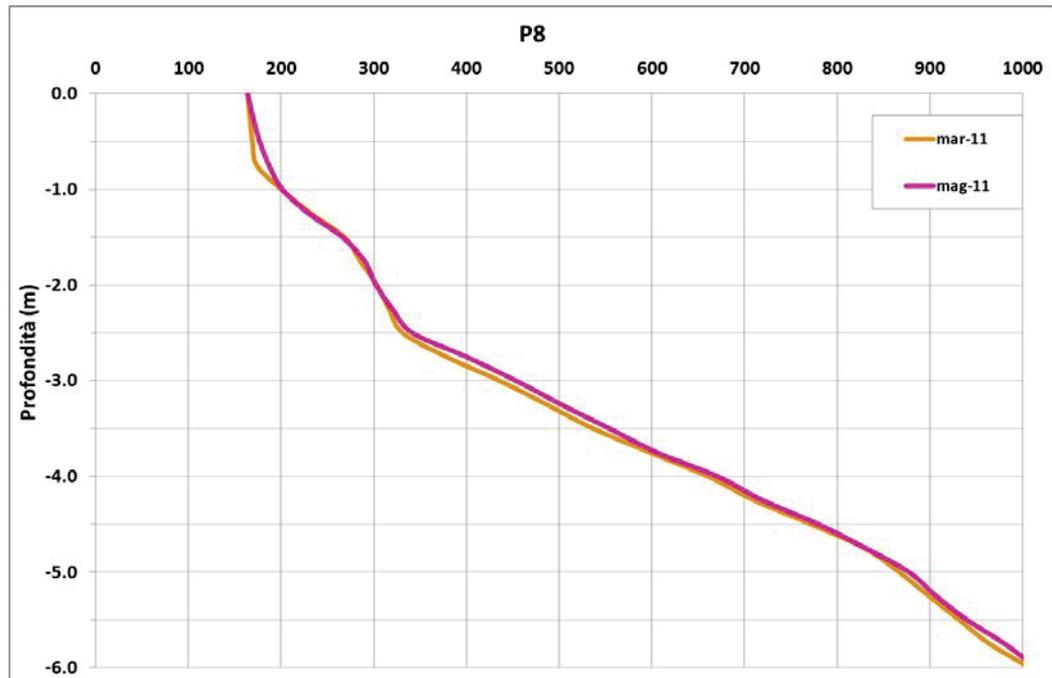


Fig. 8.41 - Profilo P08 riportante il confronto tra il rilievo di Marzo 2011 e quello di Maggio 2011.

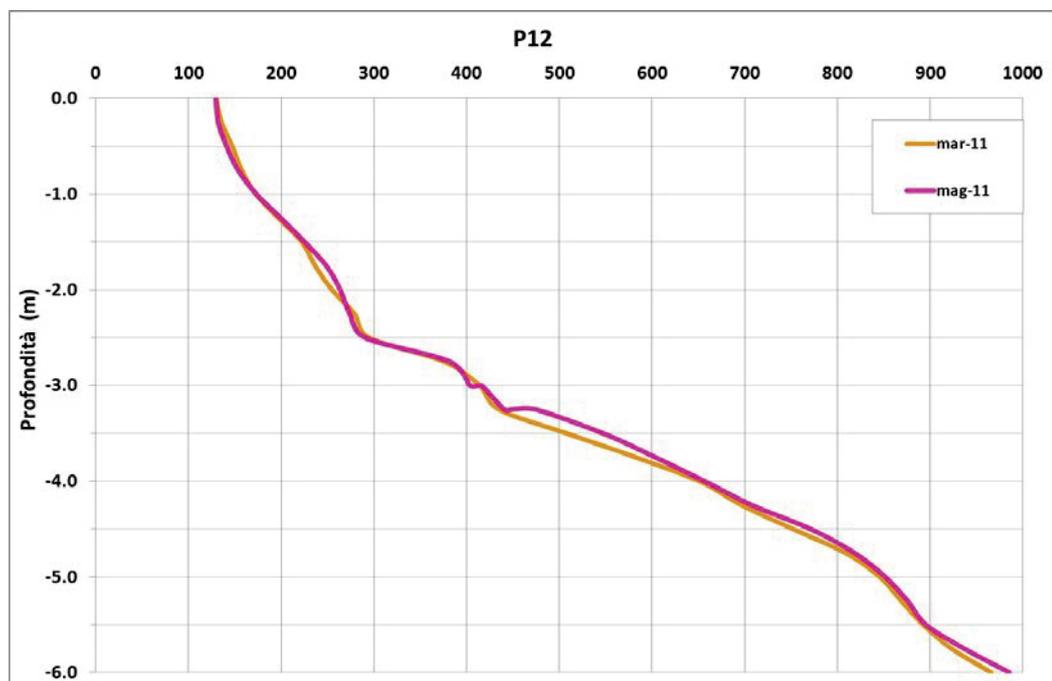


Fig. 8.42 - Profilo P12 riportante il confronto tra il rilievo di Marzo 2011 e quello di Maggio 2011.

Sottocosta si osserva una zona piuttosto estesa in accumulo, tra la linea di riva e la -1 m, con sollevamenti medi del fondale di +0,2 – 0,4 m circa (Fig. 8.43, Fig. 8.44). In

corrispondenza della base del reef, ed in particolare sotto ai moduli meridionali, l'area in abbassamento si allarga, soprattutto nella zona in cui si innesta con la barriera in massi. Infine, esternamente al reef, nella cella 6, si osserva un'area in accumulo tra i +10 ed i +25 cm entro la profondità di -3,5 m.

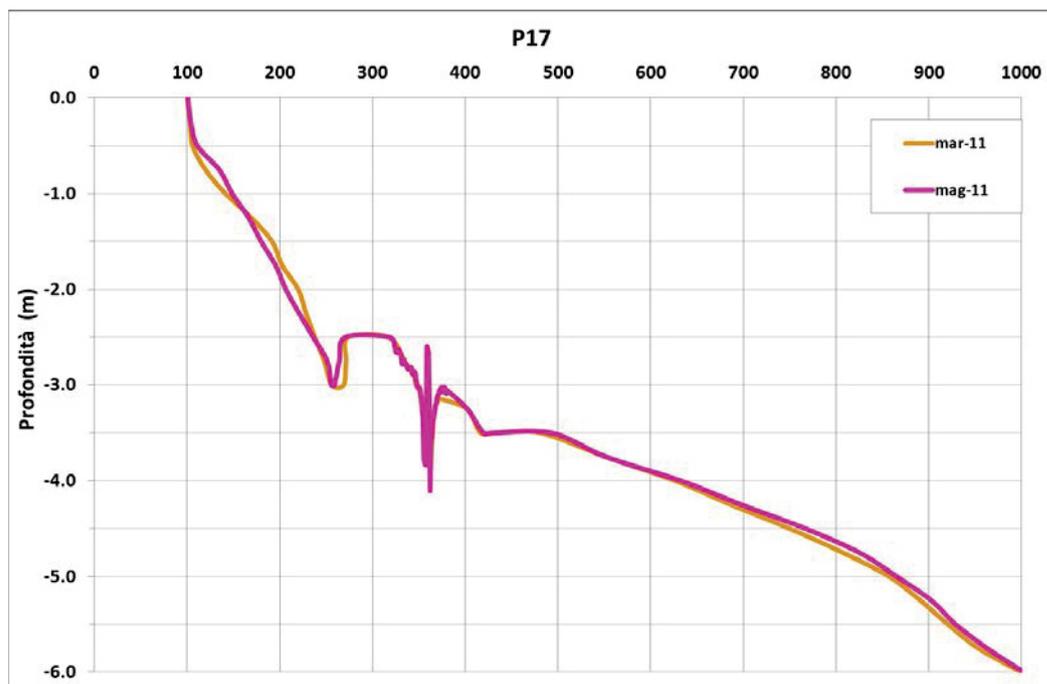


Fig. 8.43 - Profilo P17 riportante il confronto tra il rilievo di Marzo 2011 e quello di Maggio 2011.

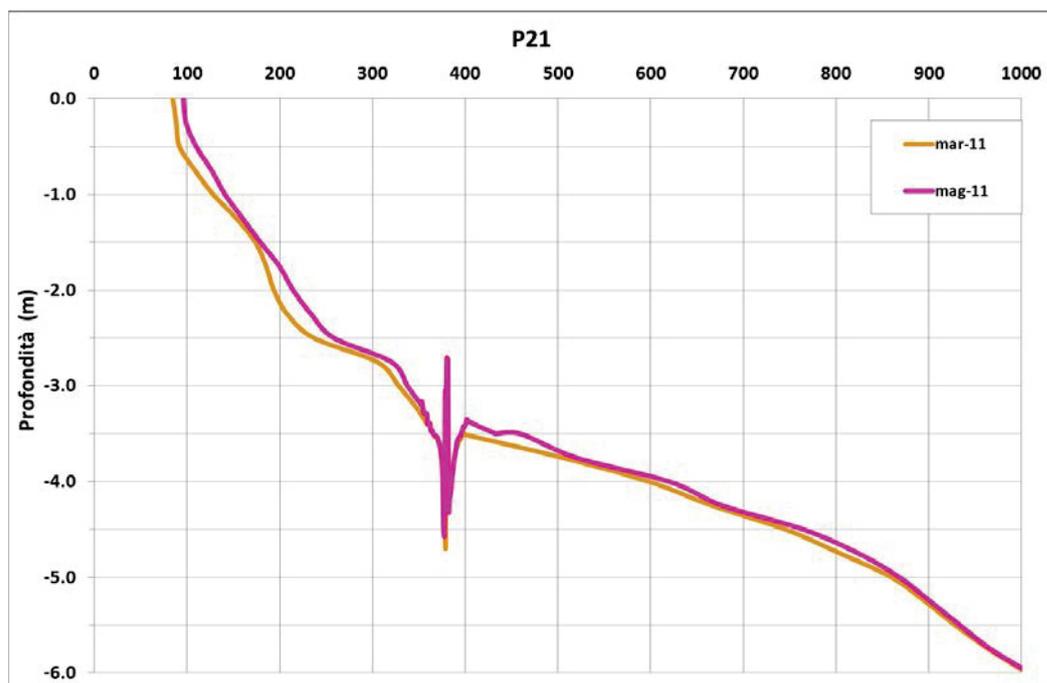


Fig. 8.44 - Profilo P21 riportante il confronto tra il rilievo di Marzo 2011 e quello di Maggio 2011.

Si evidenzia dunque una generale inversione di tendenza rispetto al confronto precedente, in quanto, a fronte di abbassamenti dei fondali che hanno caratterizzato il periodo invernale, negli ultimi due mesi si instaura un lento processo di deposizione.

In questi due mesi si osserva un guadagno volumetrico di quasi 58.000 m<sup>3</sup> esteso su tutta l'area indagata (Tab. 8.6). Le celle al largo (2, 4, 6) registrano i depositi maggiori (+44.000 m<sup>3</sup>) di materiale accumulato.

L'unica cella che registra invece un bilancio negativo è la cella 5, la cella sottocosta della zona in cui è presente il *reef* artificiale.

Marzo 2011 - Maggio 2011		
VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
+57.959	1.485.442	+0,04

Tab. 8.6 - Computo volumetrico per il periodo Marzo 2011 – Maggio 2011.

Marzo 2011 - Maggio 2011								
Celle		1	2	3	4	5	6	7
TOTALE	m <sup>3</sup>	8705	15905	3576	17138	-1763	11024	3375
	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	+0,07	+0,05	+0,03	+0,06	-0,02	+0,05	+0,01

Tab. 8.7 - Computo volumetrico per il periodo Marzo 2011 – Maggio 2011, suddiviso per celle.

**Maggio 2011 – Settembre 2011**

Nel periodo estivo non si osservano variazioni volumetriche significative (Fig. 8.45); da notare comunque la dominanza di variazioni positive, soprattutto al largo, in media non superiori ai 10 - 15 cm.

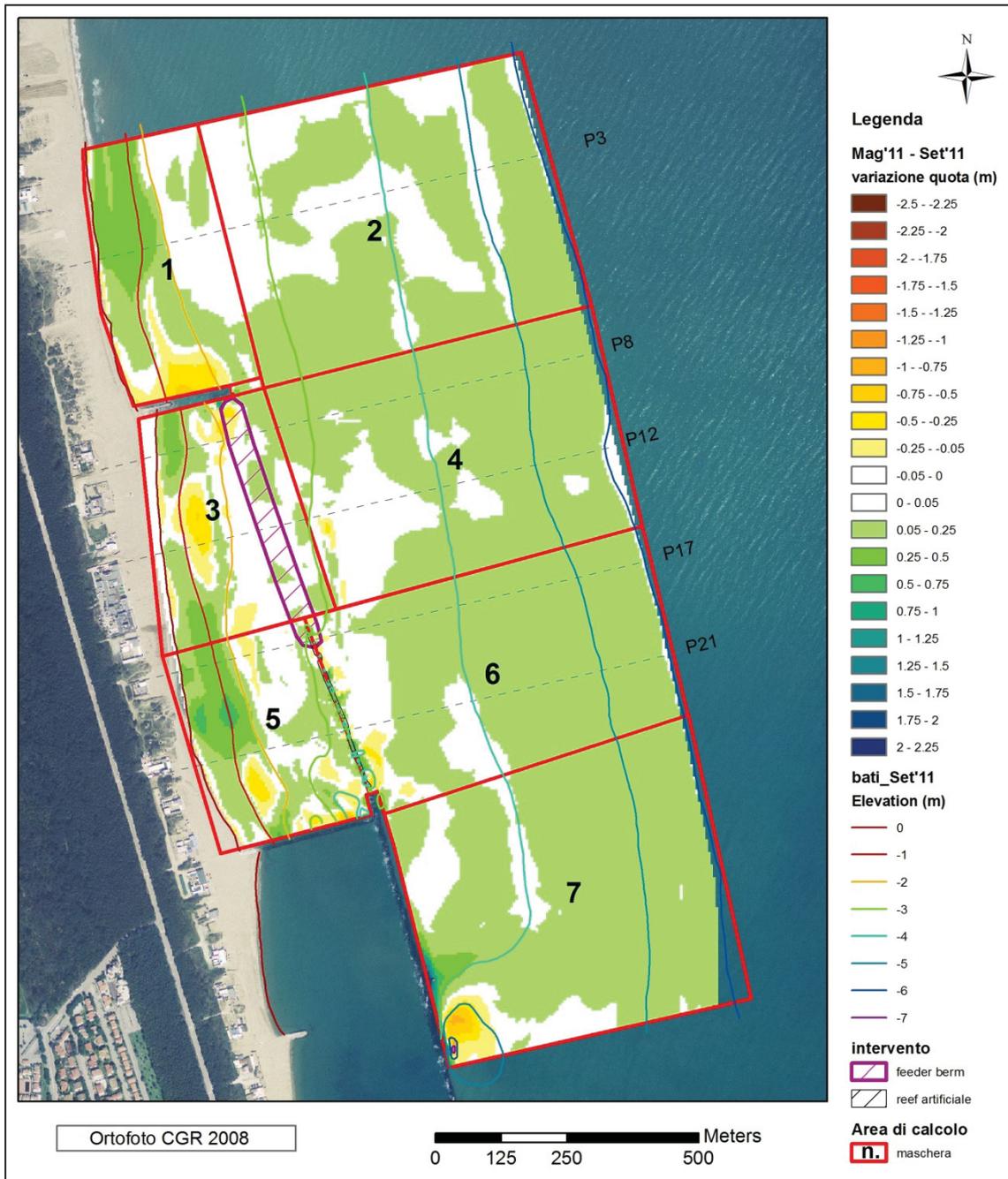


Fig. 8.45 - Mappa delle variazioni in quota riscontrate da Maggio 2011 a Settembre 2011.

Per quanto riguarda le aree verso costa, nella cella 1, a settentrione, si osserva una zona in accumulo con sollevamenti del fondale prossimo alla linea di riva compresi tra i 25 ed i 50 cm (Fig. 8.46), mentre a ridosso del pennello “ruvido” è stata riscontrata un’area in erosione, con abbassamenti di circa 50 cm, tra -1 e -2 m di profondità.

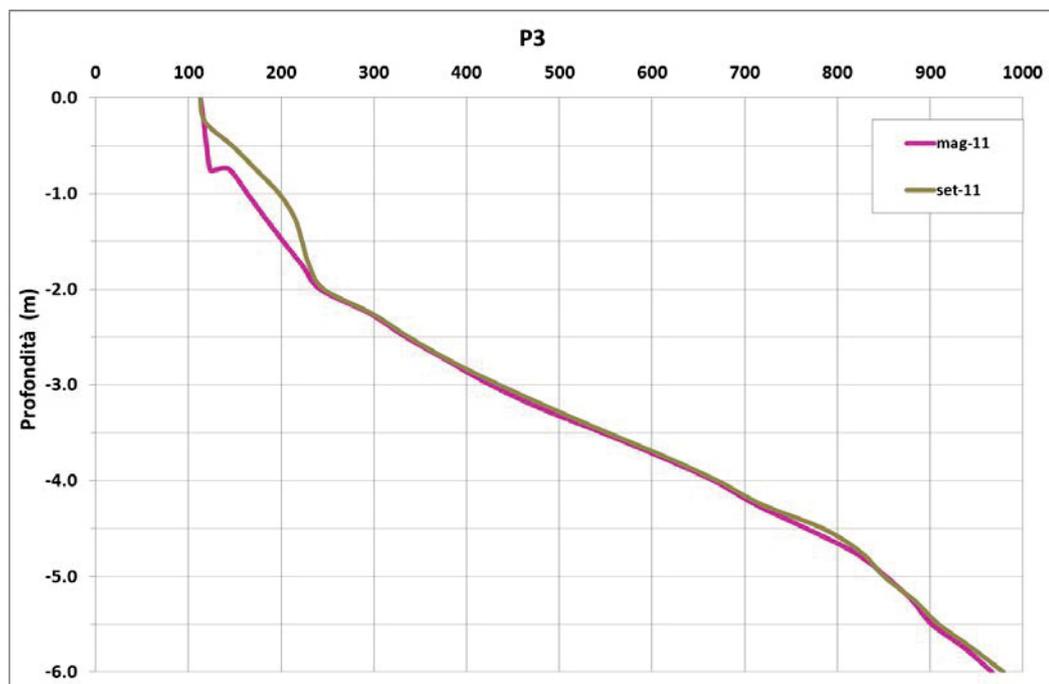


Fig. 8.46 - Profilo P03 riportante il confronto tra il rilievo di Maggio 2011 e quello di Settembre 2011.

Nell’area in corrispondenza del ripascimento sommerso (cella 3) ed in particolare in prossimità del pennello “ruvido” si osserva un deposito (+25-50 cm) ubicato tra le batimetriche di 0 e 1 m, che si estende parallelamente a costa per circa 100 m (Fig. 8.47); poco più a sud, tra le batimetriche di 1 e 2 m, si registra invece un abbassamento dei fondali, stimabile tra i -25 ed i -50 cm (Fig. 8.48).

In realtà, osservando il profilo P12, si osserva la formazione di una piccola barra sommersa con la base a circa -1,75 m di profondità e con un altezza di circa 30 cm.

Procedendo verso Sud, tra la cella 3 e la cella 5 si osserva, attorno alla batimetrica di 1 m un sollevamento dei fondali in media di 50 cm per un’estensione di circa 350 m ed una morfologia allungata parallelamente a costa (Fig. 8.49). La cella 5 mostra sollevamenti del fondale di 50 cm in media, mentre la base di appoggio del reef

evidenza ulteriori abbassamenti, benché di modesta entità (Fig. 8.50). Più al largo si osservano dei sollevamenti oltre la profondità di 3,5 m. Il resto del tratto indagato non evidenzia ulteriori significative variazioni.

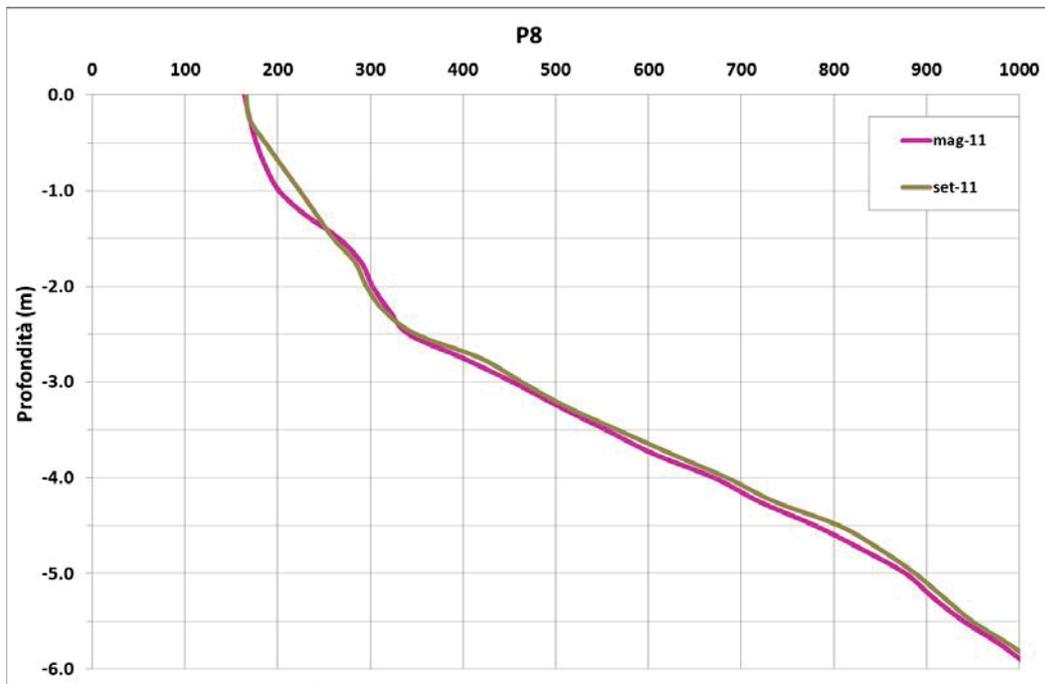


Fig. 8.47 - Profilo P08 riportante il confronto tra il rilievo di Maggio 2011 e quello di Settembre 2011.

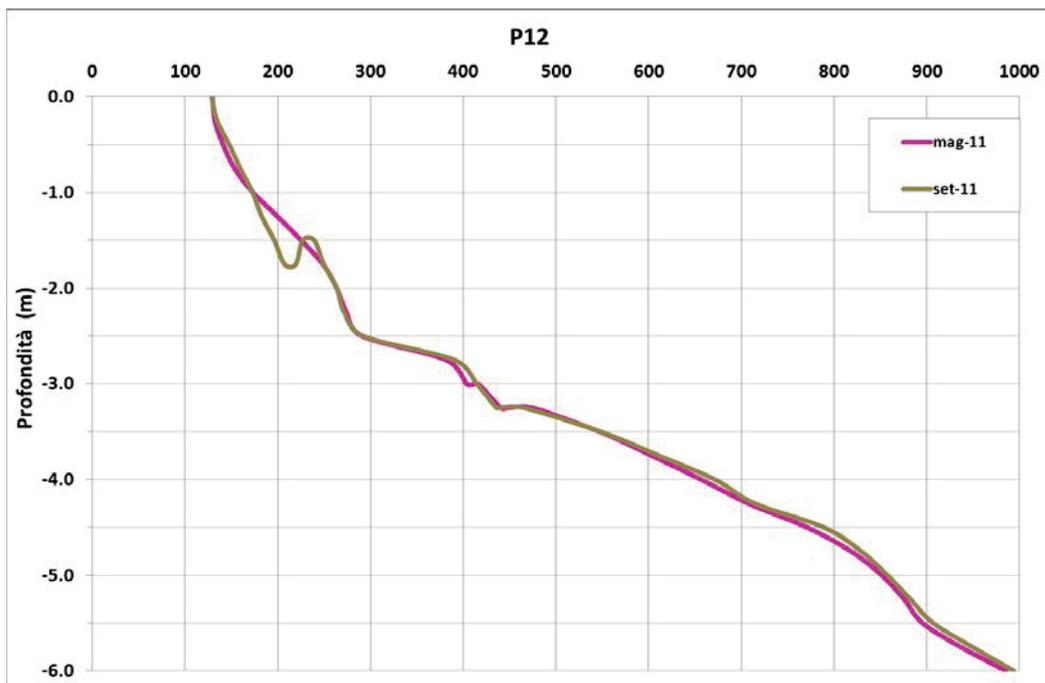


Fig. 8.48 - Profilo P12 riportante il confronto tra il rilievo di Maggio 2011 e quello di Settembre 2011.

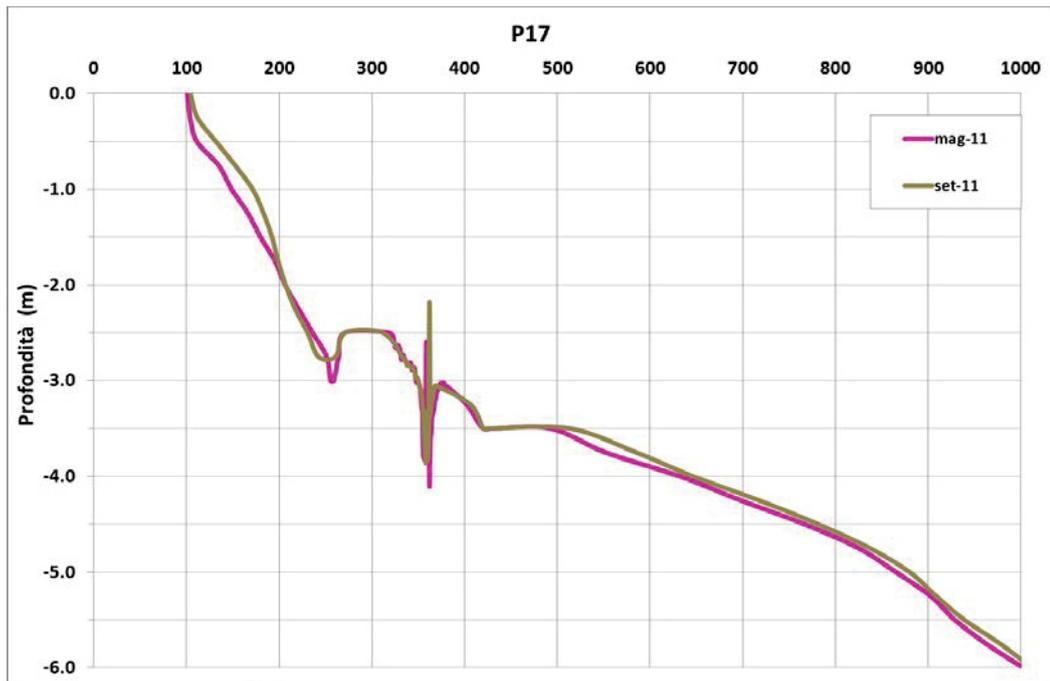


Fig. 8.49 - Profilo P17 riportante il confronto tra il rilievo di Maggio 2011 e quello di Settembre 2011.

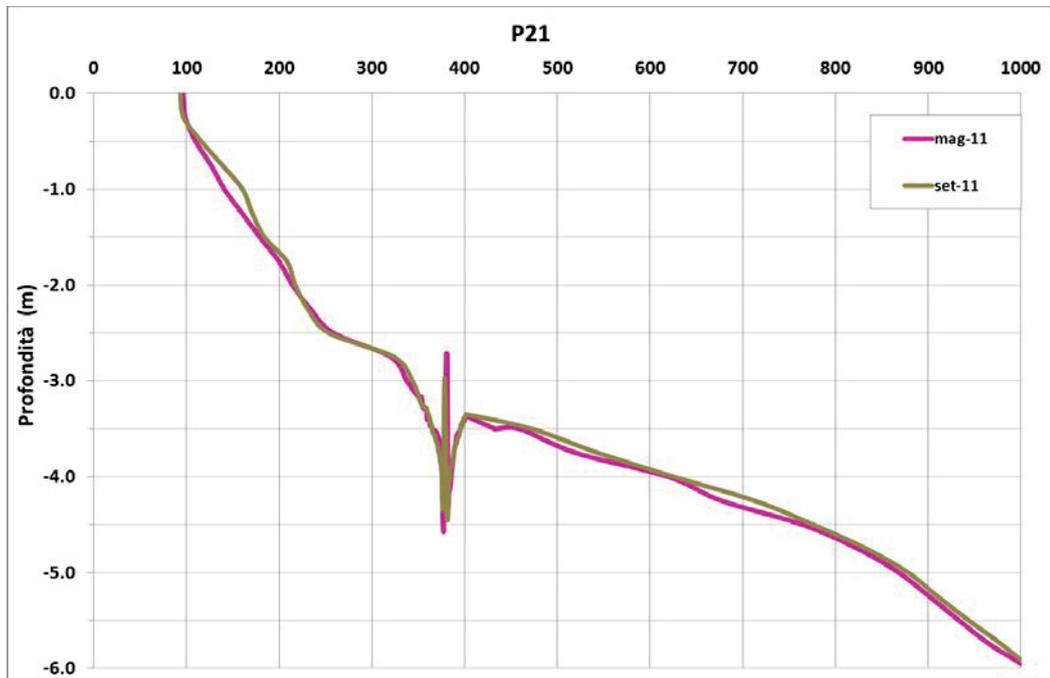


Fig. 8.50 - Profilo P21 riportante il confronto tra il rilievo di Maggio 2011 e quello di Settembre 2011.

Dal computo volumetrico eseguito nel tratto indagato risulta un guadagno di volume di materiale di circa +105.281 m<sup>3</sup> su un'area di oltre 1,3 milioni di m<sup>2</sup>; quello perso invece si può stimare di circa 15.131 m<sup>3</sup> distribuito su un'area di 126.252 m<sup>2</sup>.

Complessivamente è stato calcolato un bilancio positivo di circa +90.150 m<sup>3</sup> di sedimento depositato (Tab. 8.8).

Le celle che maggiormente hanno beneficiato dell'apporto sedimentario, in termini di m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> sono quelle al largo (2, 4, 6 e 7).

Comunque tutte le celle hanno registrato un guadagno volumetrico, sebbene la cella 3, relativa al lato verso costa del ripascimento sommerso, sia quella con il minor quantitativo di sedimento depositato (Tab. 8.9).

Maggio 2011 - Settembre 2011		
VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
+90.150	1.512.038	+0,06

Tab. 8.8 - Computo volumetrico per il periodo Maggio 2011 – Settembre 2011.

Maggio 2011 - Settembre 2011								
Celle		1	2	3	4	5	6	7
TOTALE	m <sup>3</sup>	+9.483	+15.641	+2.294	+16.760	+8.021	+15.636	+22.317
	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	+0,08	+0,05	+0,02	+0,06	+0,07	+0,06	+0,07

Tab. 8.9 - Computo volumetrico per il periodo Maggio 2011 – Settembre 2011, suddiviso per celle.

**Settembre 2011 – Gennaio 2012**

Nel periodo tra il mese di Settembre 2011 ed il mese di Gennaio 2012 le maggiori variazioni riscontrate si limitano alle zone prossime a costa (Fig. 8.51). Infatti le celle al largo (2, 4, 6 e 7) registrano variazioni di  $\pm 0,05$  m entro la batimetria dei 4,5 m; solo oltre tale profondità le variazioni riscontrate sono per lo più negative, ma non superano i -0,2 m, comunque di entità opposta rispetto ai periodi precedenti.

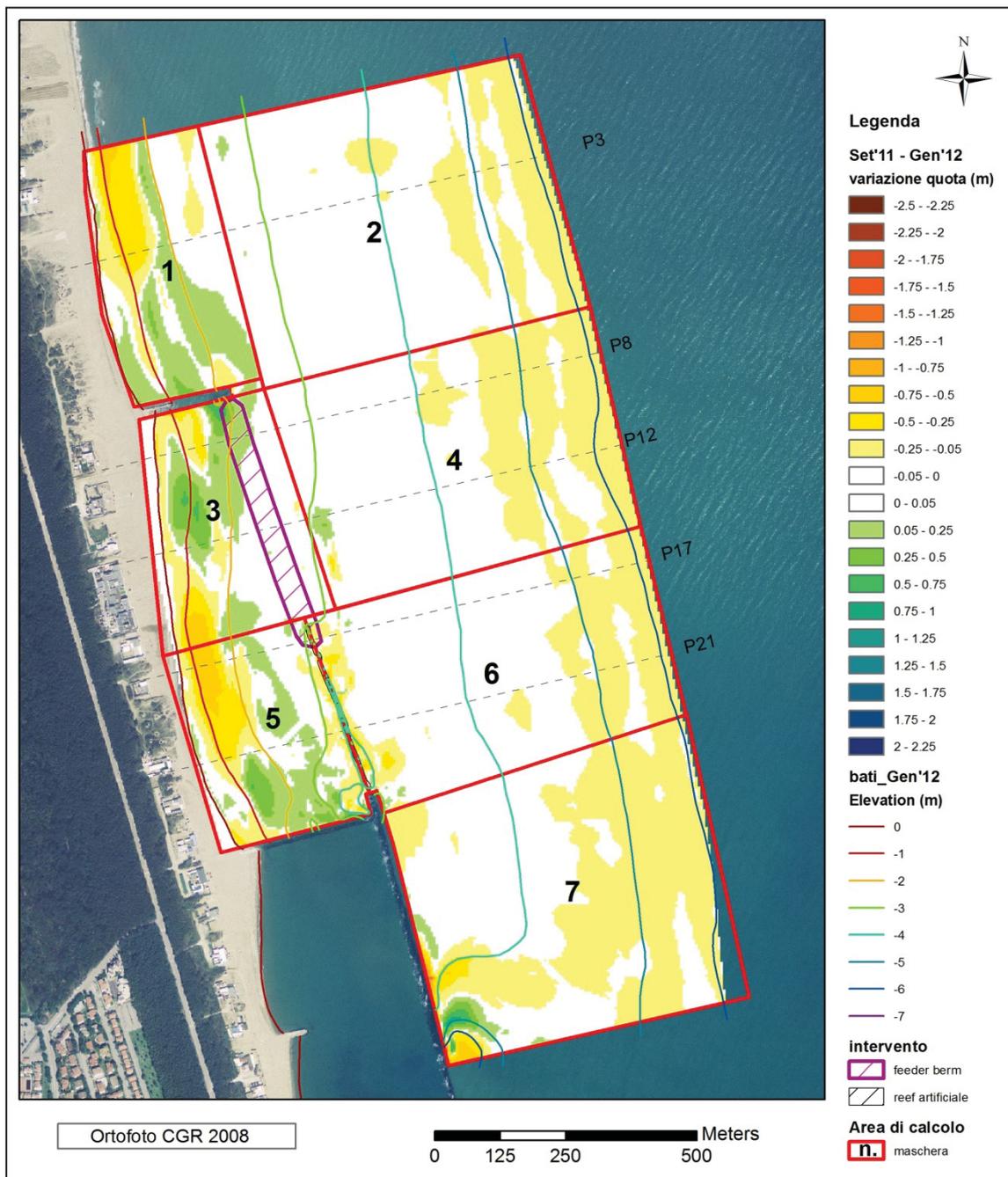


Fig. 8.51 - Mappa delle variazioni in quota riscontrate da Settembre 2011 a Gennaio 2012.

L'area a settentrione del pennello "ruvido" (cella 1) mostra una zona più a Nord in cui dominano i processi erosivi: tra -0,5 e -1,75 m di profondità si osserva un abbassamento dei fondali di circa -0,5 m per un'estensione di circa 200 m (Fig. 8.52). Verso il pennello, invece, i processi sono per lo più deposizionali, determinando sollevamenti delle quote in media di +0,2 m.

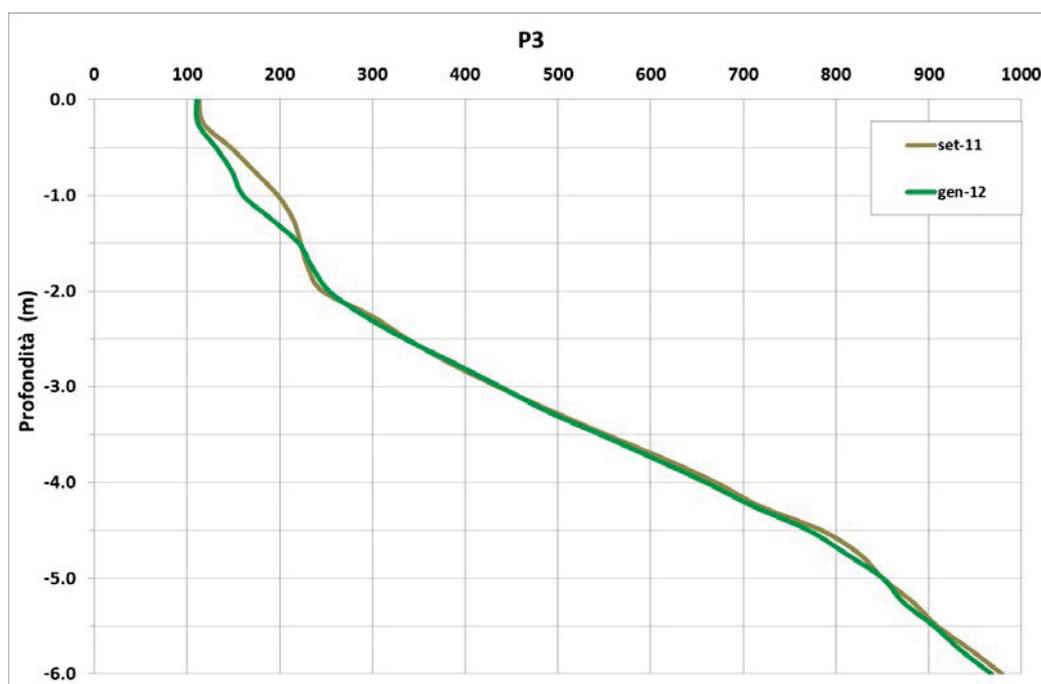


Fig. 8.52 - Profilo P03 riportante il confronto tra il rilievo di Settembre 2011 e quello di Gennaio 2012.

La cella 3 mostra, a ridosso della testata del pennello, un'erosione che ha causato un abbassamento delle quote in media di -0,1 e -0,3 m. Procedendo verso meridione, invece, il bilancio è positivo e le variazioni di quota tra le profondità di -0,5 e -2,5 m sono in media +0,2-0,4 m. Si osserva in particolare la formazione di una barra alla profondità di -1,5 m alta non più di 30 cm, di forma asimmetrica (Fig. 8.53). Invece più a Sud, la barra rilevata nel mese di Settembre 2011 viene obliterata dalla deposizione di sedimento nel truogolo (Fig. 8.54).

Tra la cella 3 e la cella 5, alla profondità di 2 m, si osserva un deposito di circa 10-20 cm di sedimento, la cui forma è molto stretta ed è allungata parallelamente a costa, mentre sottocosta si è verificata un'erosione ben più importante che ha asportato su

un tratto lungo circa 300 m fino a 0,75 m di sedimento, tra la linea di riva e la batimetrica di 1,5 m (Fig. 8.55).

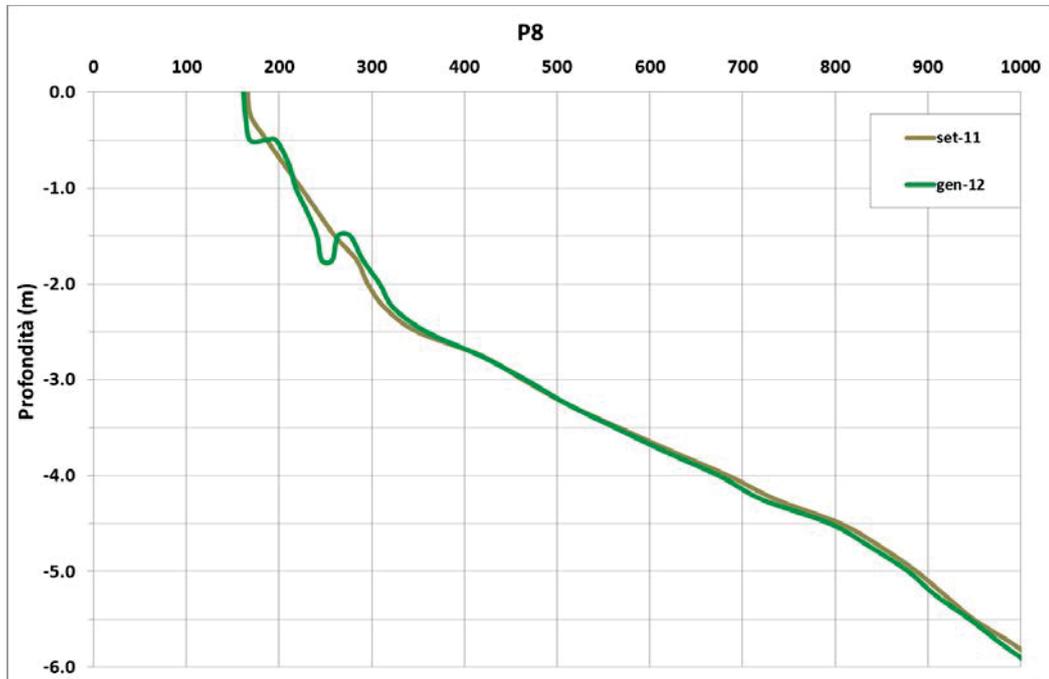


Fig. 8.53 - Profilo P08 riportante il confronto tra il rilievo di Settembre 2011 e quello di Gennaio 2012.

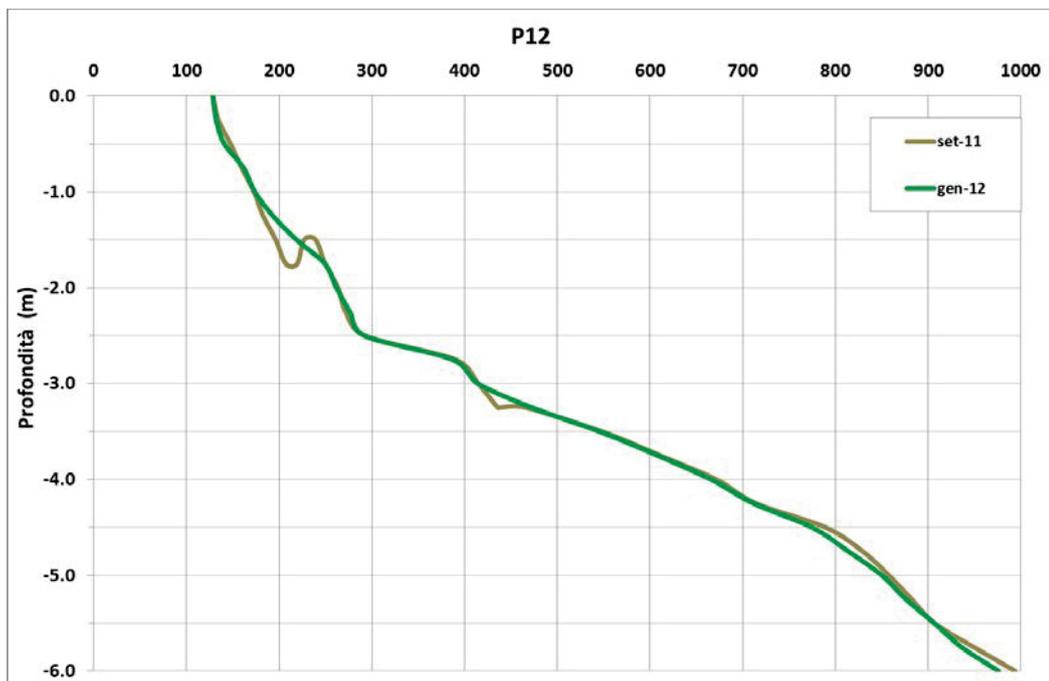


Fig. 8.54 - Profilo P12 riportante il confronto tra il rilievo di Settembre 2011 e quello di Gennaio 2012.

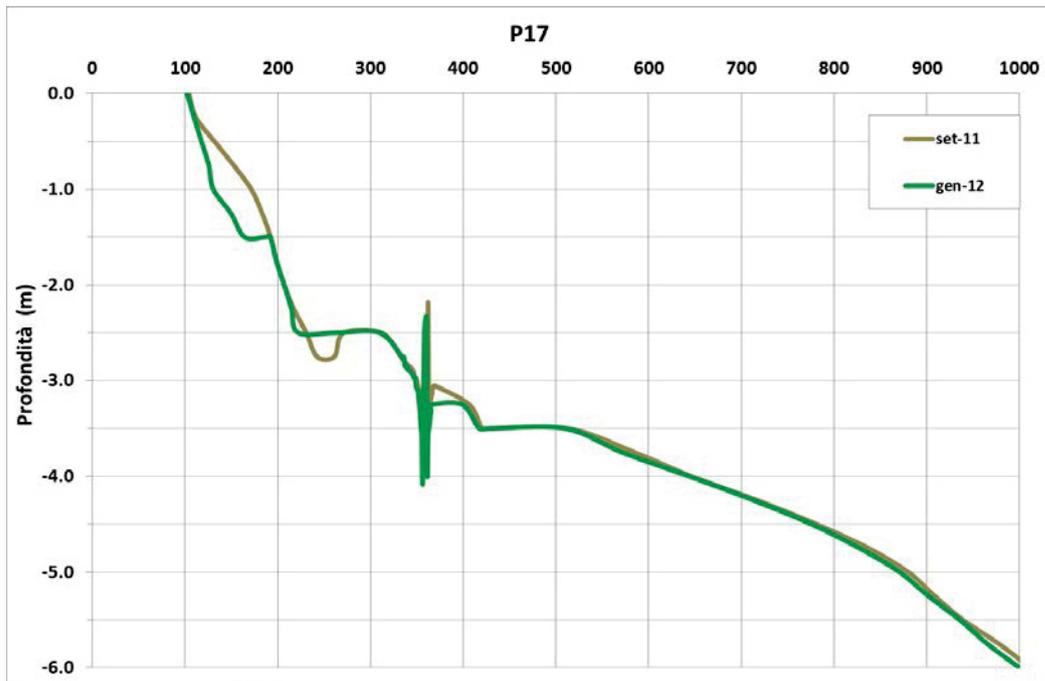


Fig. 8.55 - Profilo P17 riportante il confronto tra il rilievo di Settembre 2011 e quello di Gennaio 2012.

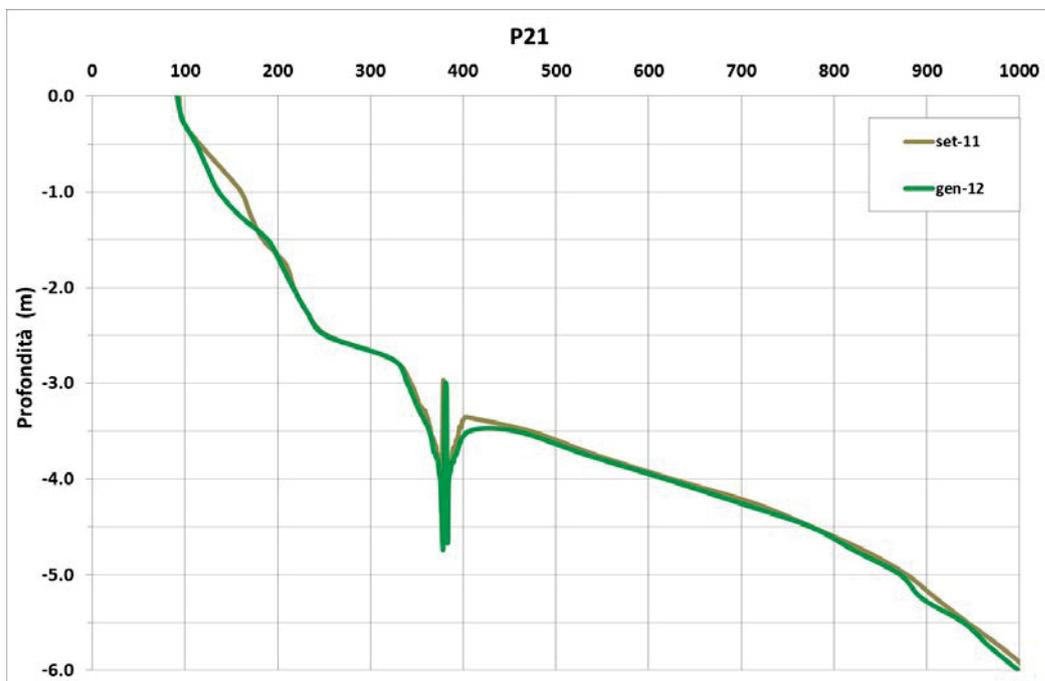


Fig. 8.56 - Profilo P21 riportante il confronto tra il rilievo di Settembre 2011 e quello di Gennaio 2012.

La cella 5, in corrispondenza del reef artificiale, mostra un abbassamento ulteriore della base di appoggio dei moduli in media di 25 cm (Fig. 8.56). Inoltre si osserva un'area in accumulo in prossimità del pennello Sud, con sollevamento dei fondali da 5 a 40 cm, tra -1 e -3 m di profondità.

Il computo volumetrico ha stimato un bilancio complessivo negativo, circa -53.800 m<sup>3</sup> di sedimento in meno (-0,04 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, Tab. 8.10).

Settembre 2011 - Gennaio 2012		
VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
-53.792	1.513.367	-0,04

Tab. 8.10 - Computo volumetrico per il periodo Settembre 2011 – Gennaio 2012.

Tale computo, suddiviso nelle varie celle, evidenzia però come soltanto la cella 3, un seppur limitato trend deposizionale, con +1.800 m<sup>3</sup> di sedimento accumulato; in tutte le altre celle il bilancio è stato negativo ed in particolare le maggiori perdite si sono verificate al largo, aumentando da Nord verso Sud (Tab. 8.11).

Settembre 2011 - Gennaio 2012								
Celle		1	2	3	4	5	6	7
TOTALE	m <sup>3</sup>	-4.207	-9.877	+1.830	-10.337	-4.145	-10.708	-16.347
	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	-0,03	-0,03	+0,01	-0,04	-0,04	-0,04	-0,06

Tab. 8.11 - Computo volumetrico per il periodo Settembre 2011 – Gennaio 2012, suddiviso per celle.

**Gennaio 2012 – Marzo 2012**

Le variazioni riscontrate tra i rilievi di Gennaio e Marzo 2012, a seguito del periodo invernale, evidenziano un accumulo importante di sedimento oltre la profondità dei 5 m, su tutto il tratto indagato. Le variazioni di quota riscontrate sono in media di +0,25 – 0,4 m (celle 2, 4 e 6, Fig. 8.57).

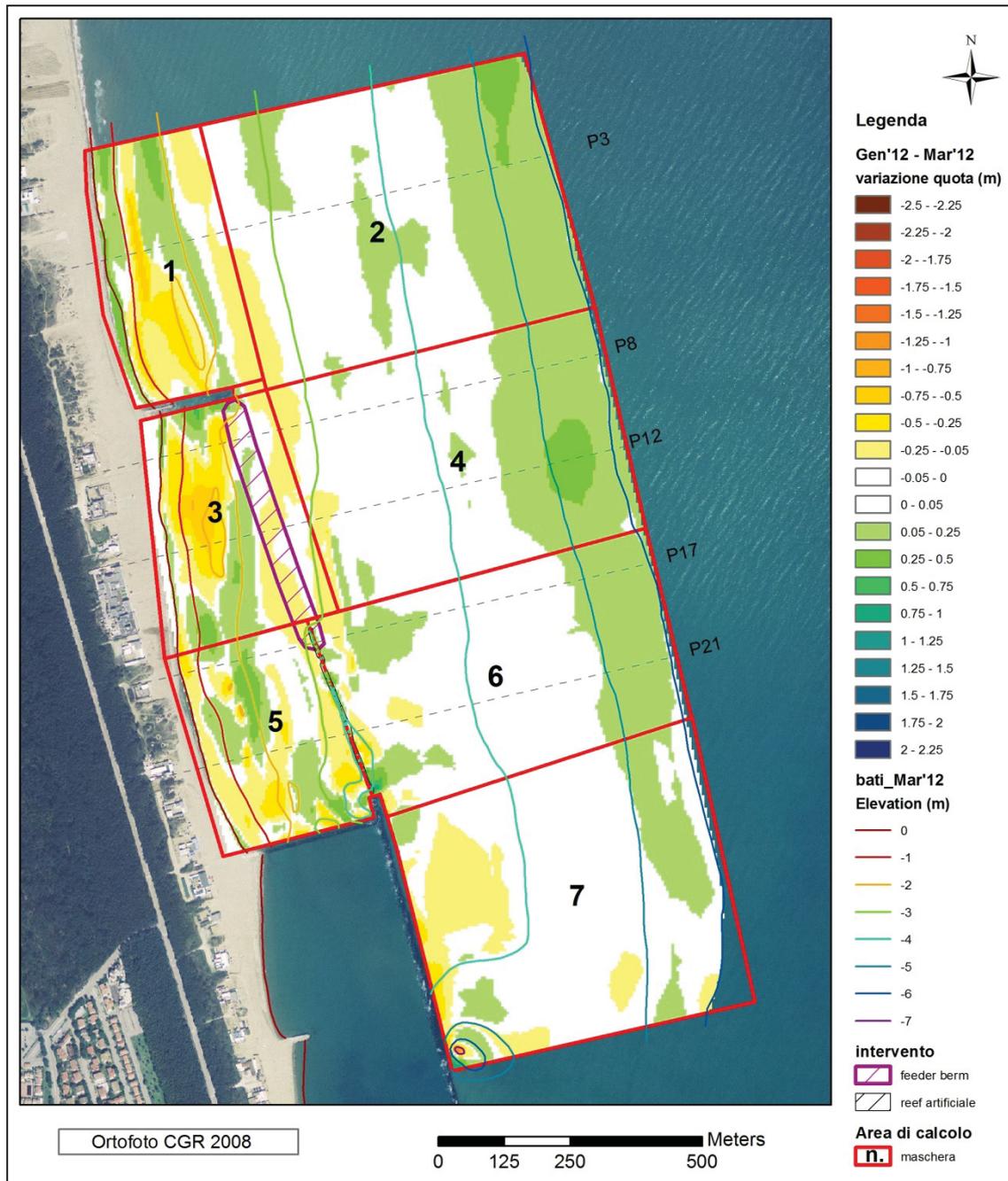


Fig. 8.57 - Mappa delle variazioni in quota riscontrate da Gennaio 2012 a Marzo 2012.

I fondali tra la batimetrica dei 3,5 m e quella dei 5 m invece non evidenziano particolari evoluzioni. Si osserva soltanto una zona in erosione intorno alla profondità di -2,5 m (tra le celle 1 e 2 , 3 e 4, 5 e 6) con abbassamenti di circa 0,2 m che si estende quindi fino alla porzione di fondale interessata dal reef artificiale.

Le zone prossime a costa mostrano variazioni maggiori, con alternanze di aree in accumulo ed aree in erosione. Si osserva, per la cella 1, una zona compresa tra la linea di riva e la profondità di 1 m un accumulo di circa 0,2 m che percorre tutta la cella da Nord a Sud. La fascia successiva, verso il largo, è caratterizzata da una perdita di sedimento di 0,25 – 0,30 m. Attorno alla batimetrica dei 3 m ritorna a depositarsi del sedimento, con spessori di circa 30 cm a Nord, ma che si riduce spostandoci verso il pennello “ruvido”. E' evidente la formazione di una barra alla profondità di -1,75 m alta circa 0,5 m e appuntita verso costa, con un profondo truogolo (Fig. 8.58).

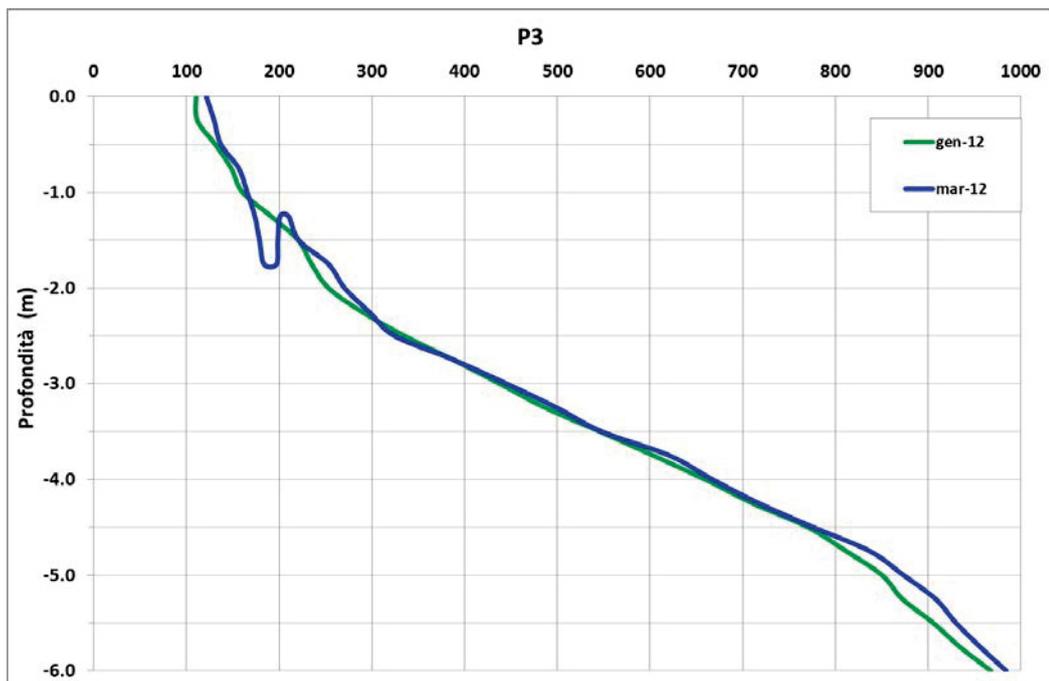


Fig. 8.58 - Profilo P03 riportante il confronto tra il rilievo di Gennaio 2012 e quello di Marzo 2012.

Sia nella cella 3 che nella cella 5, tra la linea di riva e la profondità di -3 m, si osserva un'ampia zona in abbassamento, con variazioni di quota che raggiungono anche i -0,75 m. La cella 3 mostra la scomparsa della barra rilevata a Gennaio 2012

nella zona più a Nord (Fig. 8.59), mentre più a Sud la barra compare nuovamente a circa -2 m di profondità (Fig. 8.60), con un'altezza di circa 30 cm. Nel tratto al largo del reef si osserva una zona in accumulo, che si estende per oltre 500 m con spessori fino a 0,5 m (Fig. 8.61).

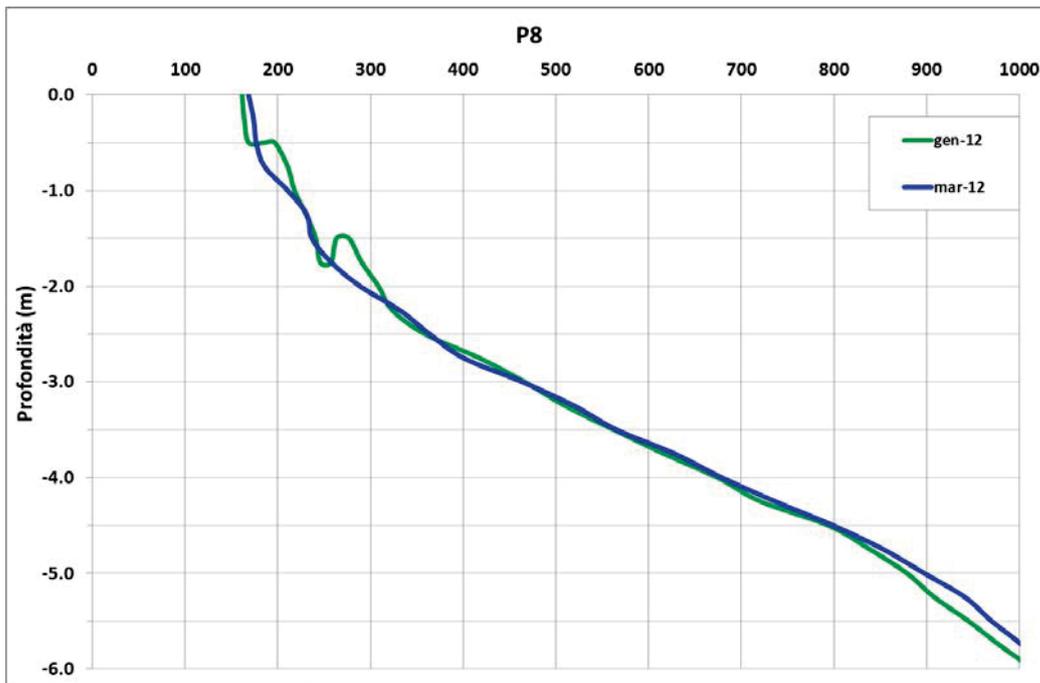


Fig. 8.59 - Profilo P08 riportante il confronto tra il rilievo di Gennaio 2012 e quello di Marzo 2012.

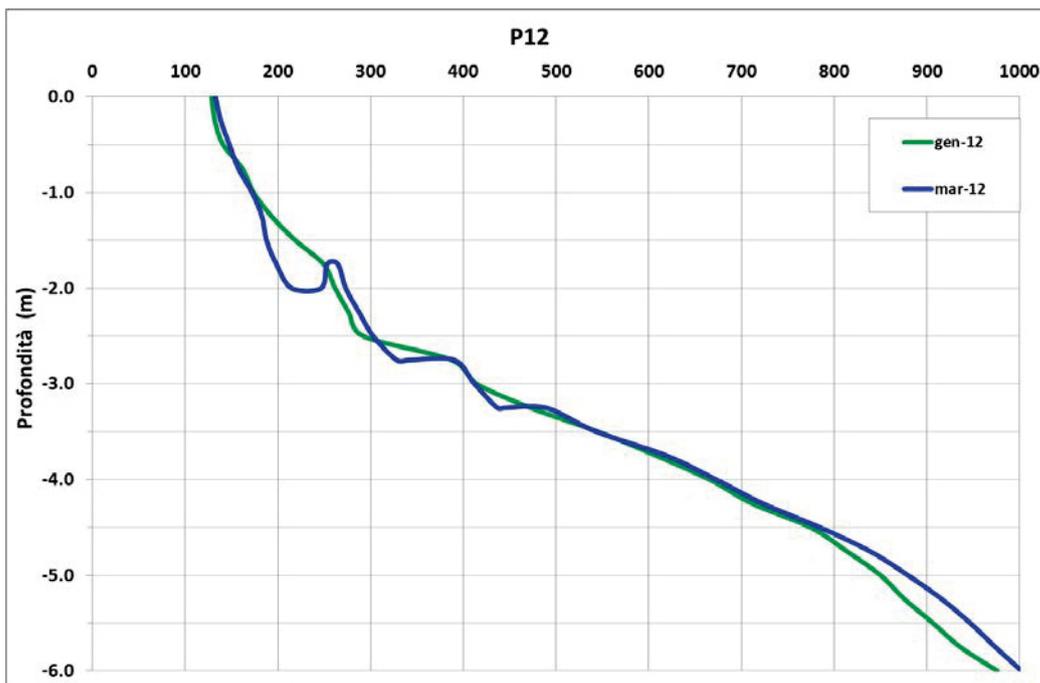


Fig. 8.60 - Profilo P12 riportante il confronto tra il rilievo di Gennaio 2012 e quello di Marzo 2012.

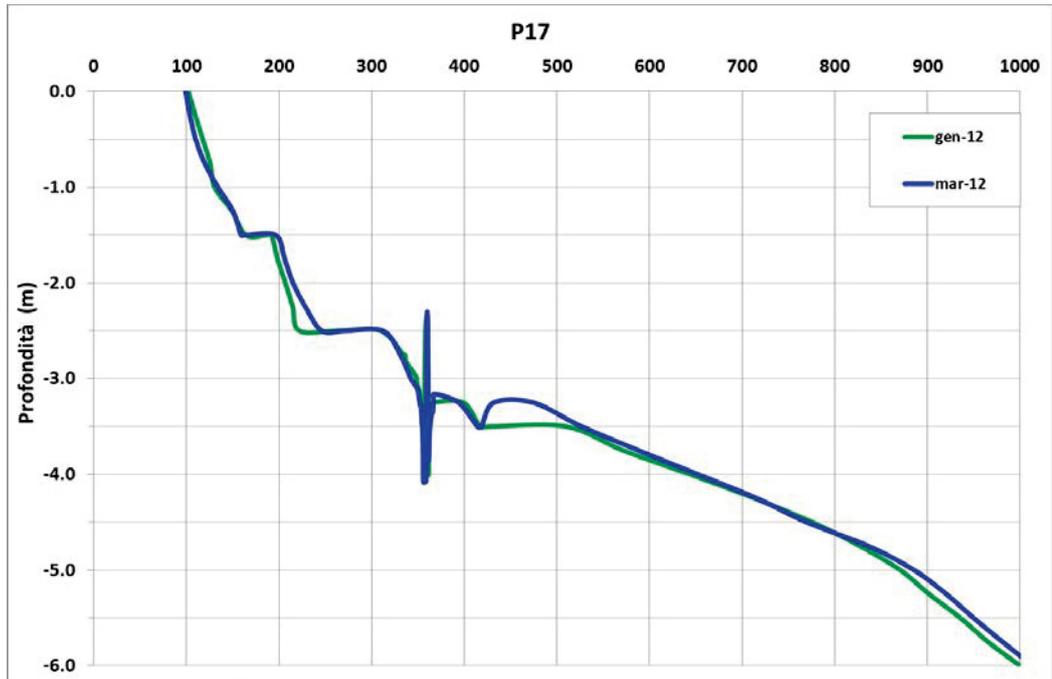


Fig. 8.61 - Profilo P17 riportante il confronto tra il rilievo di Gennaio 2012 e quello di Marzo 2012.

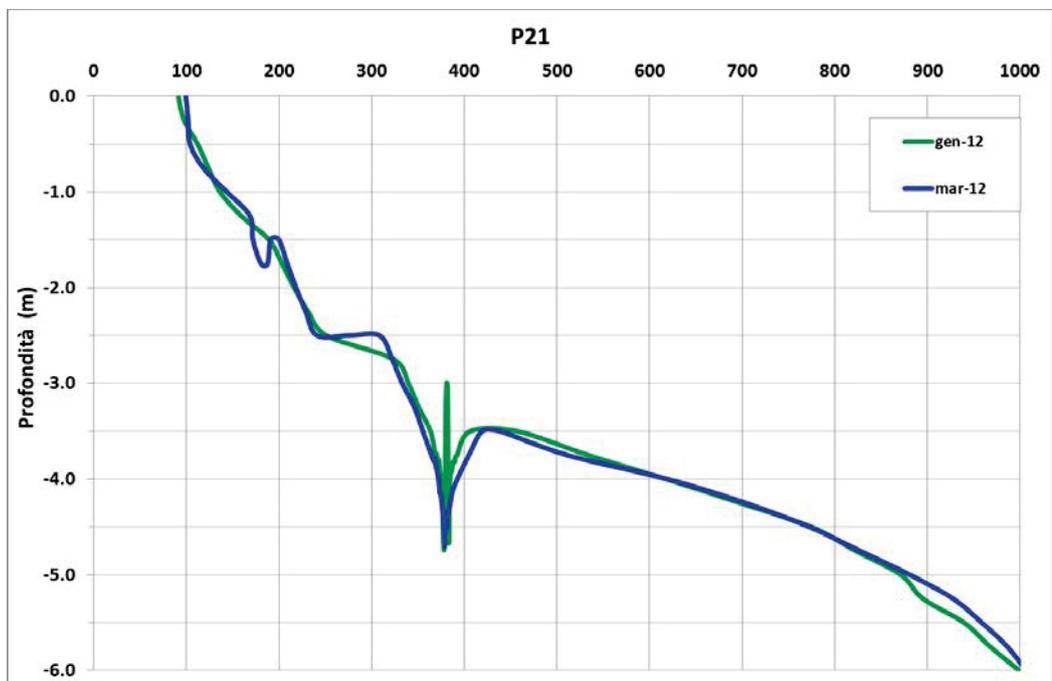


Fig. 8.62 - Profilo P21 riportante il confronto tra il rilievo di Gennaio 2012 e quello di Marzo 2012.

E' interessante osservare la presenza di accumulo subito al largo del reef, nella sua porzione meridionale (cella 6), di pochi centimetri e poco esteso lateralmente, ma che si allunga trasversalmente a costa verso il largo.

In questo intervallo di tempo, durante l'inverno, si osserva inaspettatamente un bilancio sedimentario positivo, con circa 52.000 m<sup>3</sup> di sedimento depositato (Tab. 8.12).

Osservando le variazioni volumetriche suddivise per celle (Tab. 8.13), emerge che le celle che hanno beneficiato di tale apporto sono quelle verso il largo ed in particolare le celle 2, 4 e 6 (+0,07 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>).

La cella 3, relativa al ripascimento sommerso, è invece l'unica che presenta valori negativi con una perdita di circa -0,04 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Nelle altre celle la variazione è trascurabile.

Gennaio 2012 - Marzo 2012		
VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
+52.044	1.502.186	+0,03

Tab. 8.12 – Computo volumetrico per il periodo Gennaio 2012 – Marzo 2012.

Gennaio 2012 - Marzo 2012								
Celle		1	2	3	4	5	6	7
TOTALE	m <sup>3</sup>	-991	+25.236	-5.626	+19.957	+1.625	+11.274	+571
	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	-0,01	+0,08	-0,04	+0,07	+0,01	+0,05	0,00

Tab. 8.13 - Computo volumetrico per il periodo Gennaio 2012 – Marzo 2012, suddiviso per celle.

**Marzo 2012 – Giugno 2012**

Ancor più evidente del periodo precedente è il trend deposizionale che si osserva sui fondali oltre la profondità dei 3 m (Fig. 8.63).

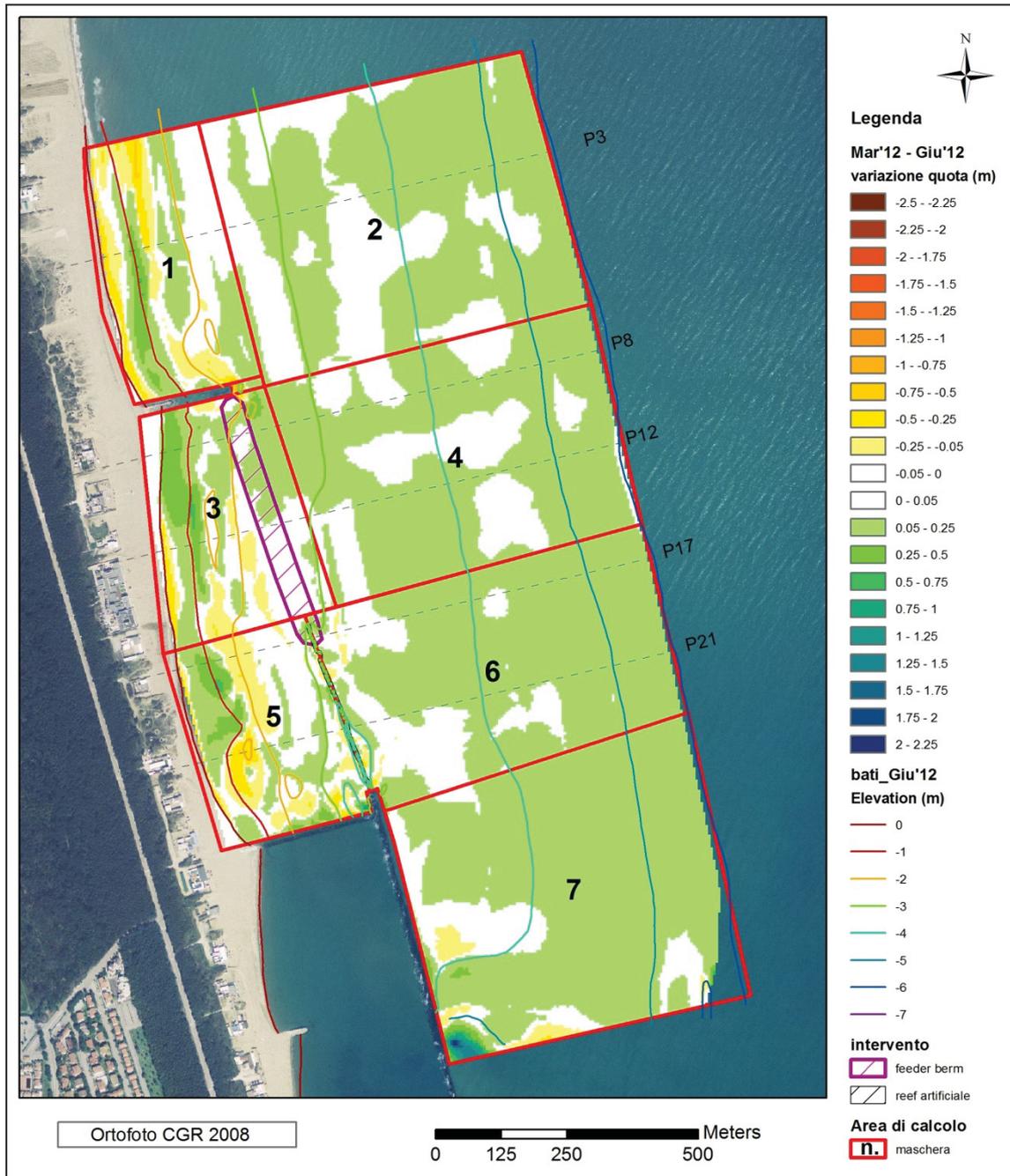


Fig. 8.63 - Mappa delle variazioni in quota riscontrate da Marzo 2012 a Giugno 2012.

Benché le variazioni non superino i 20 cm di spessore, è chiara la tendenza evolutiva dei fondali su tutte le celle esterne (2, 4, 6 e 7).

Sottocosta, invece, continuano ad alternarsi aree in accumulo ed aree in erosione. In particolare, tutte le celle interne (1, 3 e 5), tra le profondità di -0,5 e -1,5 mostrano sollevamenti medi delle quote di +0,5 con zone però in cui arrivano a +0,75 m. Al contrario, tra le profondità da -1,5 e -2,25 m vi è stata erosione, più accentuata nella cella 5.

Si sottolinea in particolare nella cella 1 lo smantellamento della barra rilevata nel mese di Marzo ed il riempimento del truogolo. Il fondale non assume però una morfologia uniforme, ma presenta delle rotture di pendenza (Fig. 8.64).

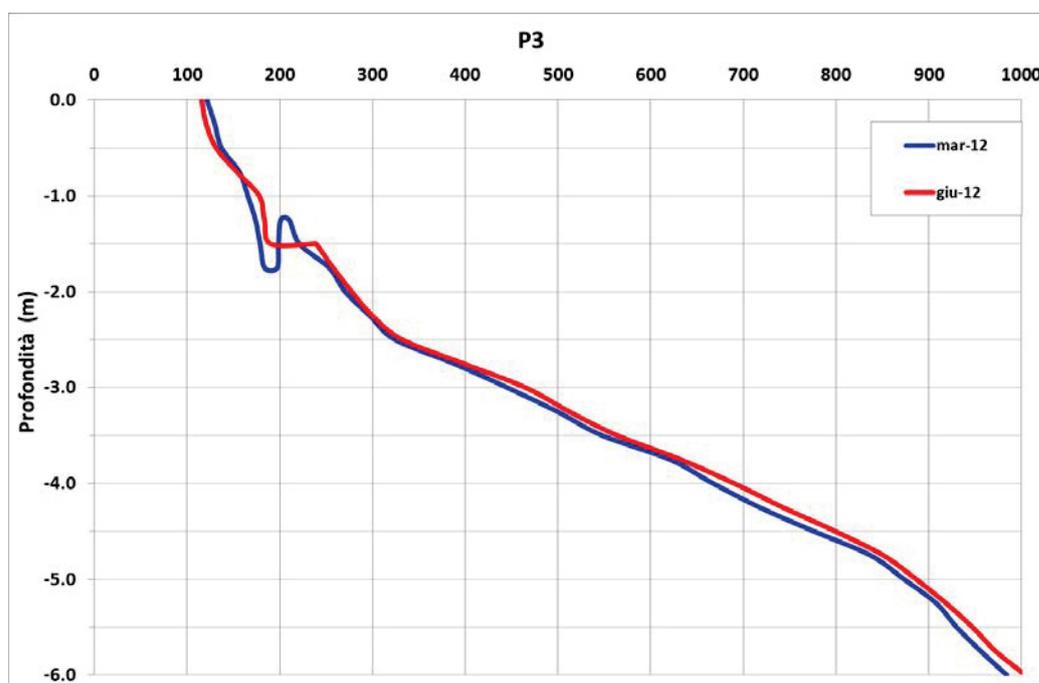


Fig. 8.64 - Profilo P03 riportante il confronto tra il rilievo di Marzo 2012 e quello di Giugno 2012.

I profili in corrispondenza del ripascimento sommerso evidenziano gli accumuli già descritti in prossimità della linea di riva nella porzione più settentrionale della cella 3 (Fig. 8.65), mentre più a meridione si osserva la permanenza della barra rilevata in Marzo 2012 (Fig. 8.66).

La zona interessata dal reef non sembra aver subito ulteriori abbassamenti, se non in alcuni sporadici punti, ubicati nella porzione settentrionale della struttura (Fig. 8.67).

Si sottolinea infine, la persistenza di una barra in posizione circa centrale rispetto alla cella 5, dietro il reef. Tale barra, già rilevata nel mese di Marzo 2012 sembra aver aumentato le sue dimensioni ed essersi approfondita. Nel rilievo di Giugno è ubicata alla profondità di -2,25 m ed ha un'altezza di circa 40 cm (Fig. 8.68).

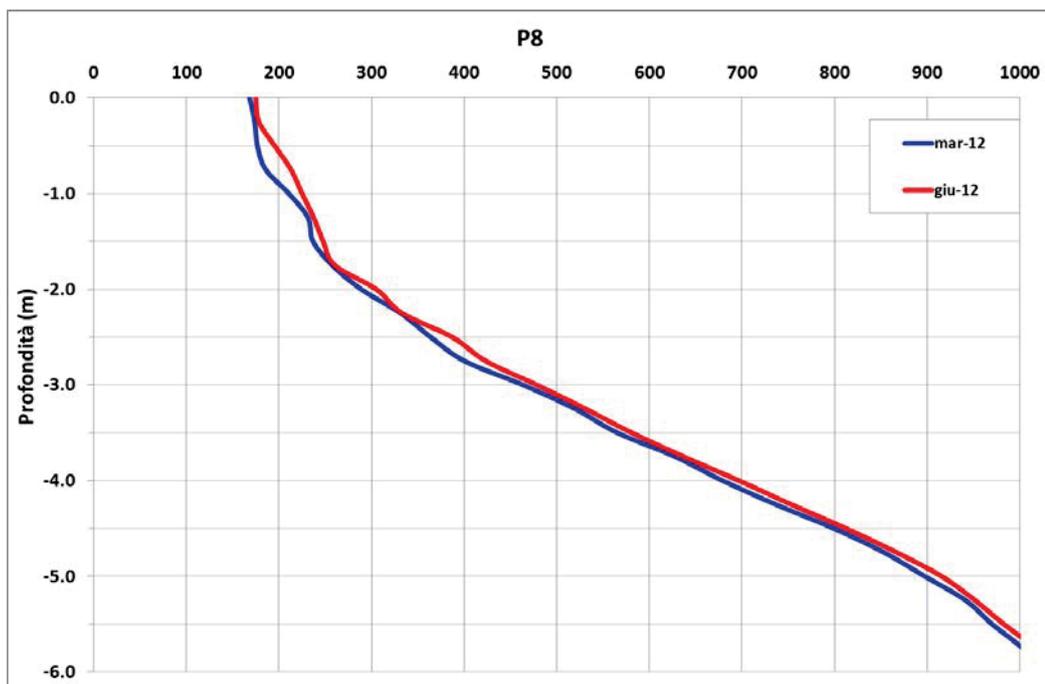


Fig. 8.65 - Profilo P08 riportante il confronto tra il rilievo di Marzo 2012 e quello di Giugno 2012.

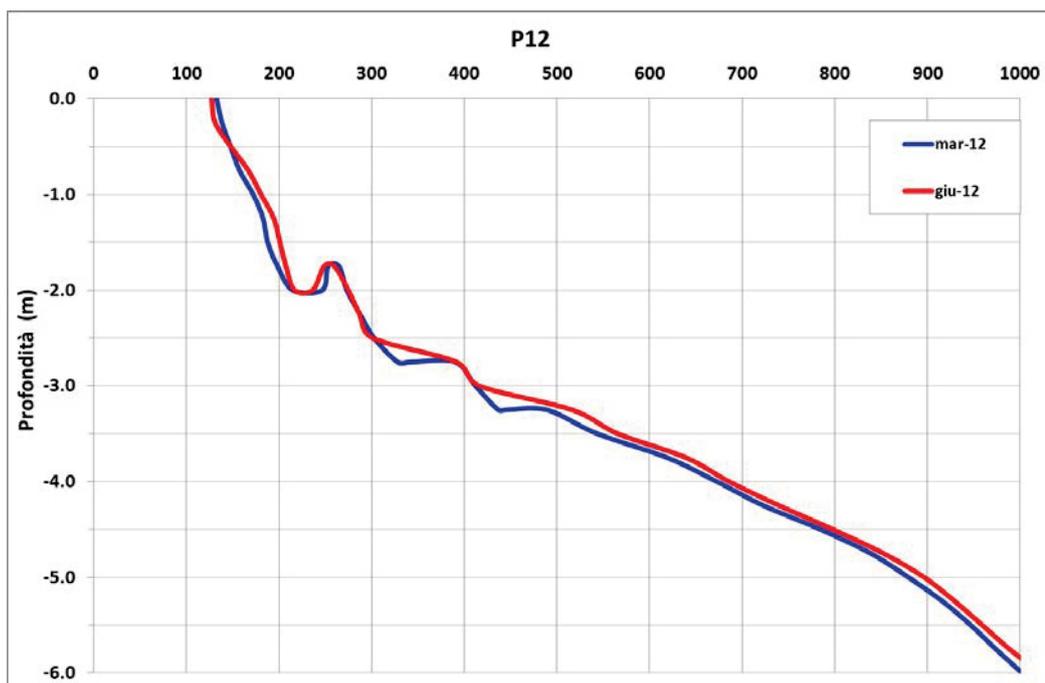


Fig. 8.66 - Profilo P12 riportante il confronto tra il rilievo di Marzo 2012 e quello di Giugno 2012.

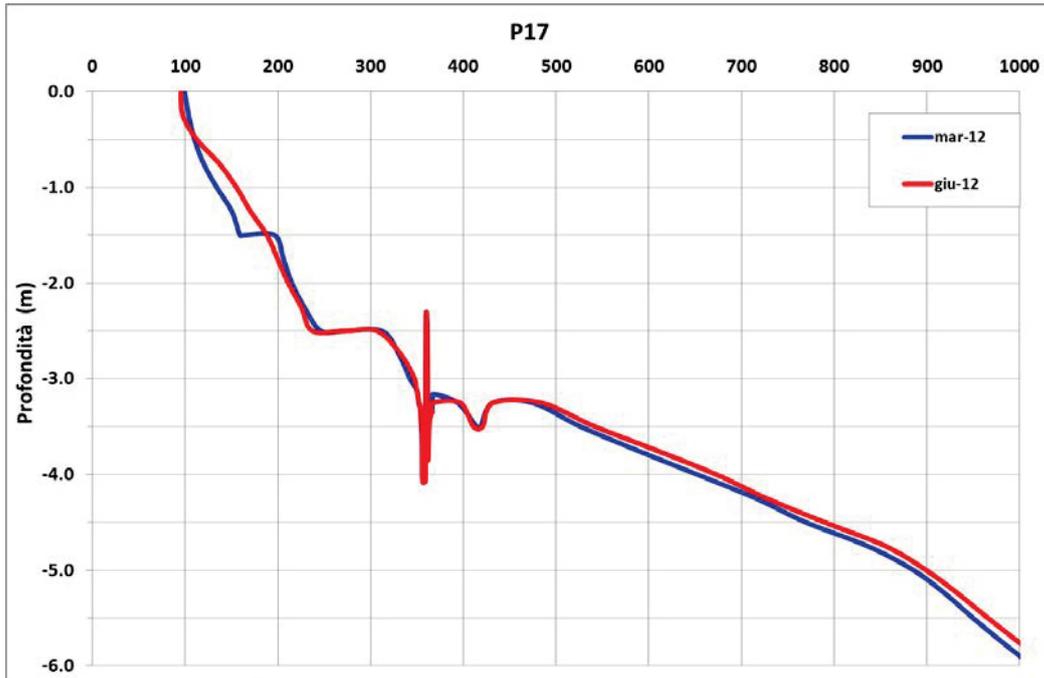


Fig. 8.67 - Profilo P17 riportante il confronto tra il rilievo di Marzo 2012 e quello di Giugno 2012.

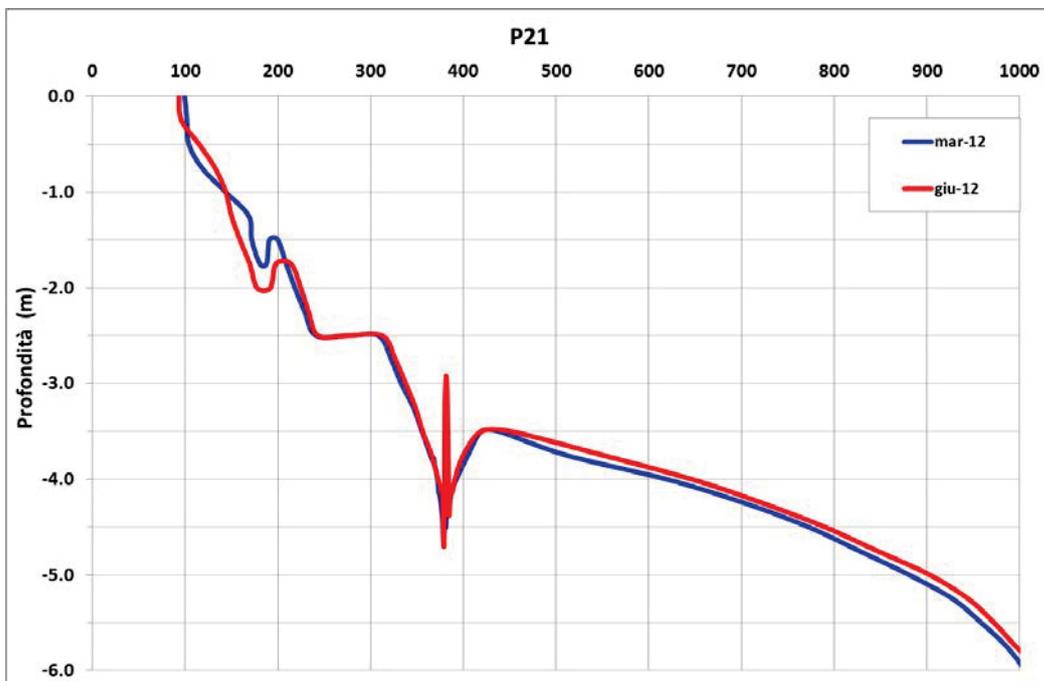


Fig. 8.68 - Profilo P21 riportante il confronto tra il rilievo di Marzo 2012 e quello di Giugno 2012.

Il bilancio sedimentario computato durante questi mesi primaverili è estremamente positivo, con un guadagno di +106,800 m<sup>3</sup> di sedimento (in media +0,07 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, Tab. 8.14).

E' evidente come il trend sia stato positivo per tutte le celle e maggiormente per quelle esterne con depositi in media di 0,08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

Il dato interessante è rappresentato dal bilancio sedimentario della cella 3, in corrispondenza del ripascimento sommerso che registra un deposito di circa 10.000 m<sup>3</sup> di sabbia al suo interno (+0,08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, Tab. 8.15).

Marzo 2012 - Giugno 2012		
VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
+106.804	1.503.378	+0,07

Tab. 8.14 - Computo volumetrico per il periodo Marzo 2012 – Giugno 2012.

Marzo 2012 - Giugno 2012								
Celle		1	2	3	4	5	6	7
TOTALE	m <sup>3</sup>	+3.683	+23.027	+10.281	+19.650	+4.465	+17.402	+28.296
	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	+0,03	+0,07	+0,08	+0,07	+0,04	+0,07	+0,09

Tab. 8.15 - Computo volumetrico per il periodo Marzo 2012 – Giugno 2012, suddiviso per celle.

**Giugno 2012 – Ottobre 2012.**

L'ultimo periodo analizzato è quello estivo, includendo anche il primo mese autunnale del 2012. Come si osserva in Fig. 8.69, al largo non si registrano variazioni significative dei fondali ( $\pm 0,05$  m). Sottocosta invece si osservano gli stessi trend già discussi nei precedenti confronti.

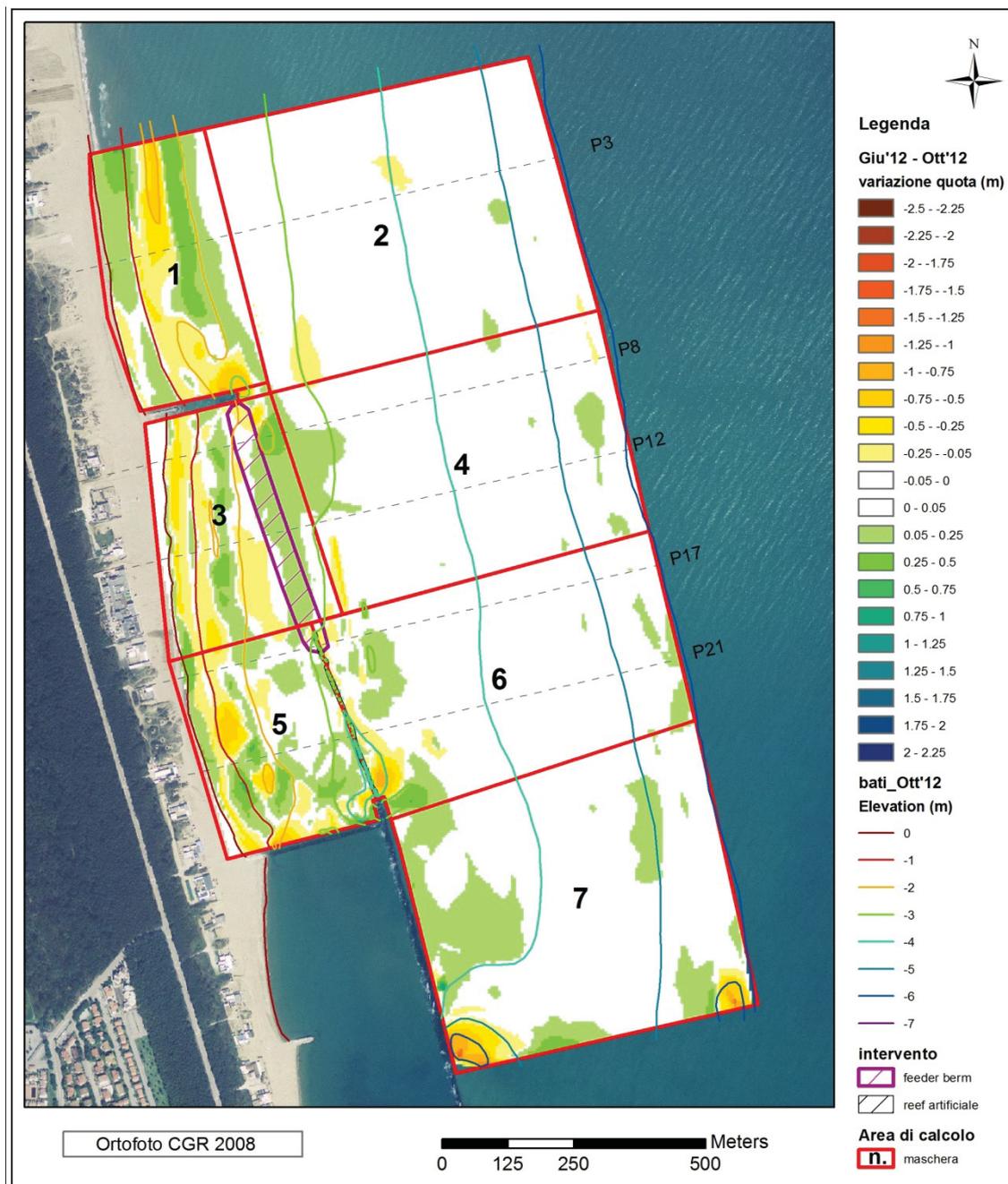


Fig. 8.69 - Mappa delle variazioni in quota riscontrate da Giugno 2012 ad Ottobre 2012.

Nella cella 1, infatti, si evidenzia un deposito tra la linea di riva e -1 m, con uno spessore medio di +0,25 m, poi si osserva tra le profondità di -1 e -1,5 m un'erosione di circa -0,5 m e poi, nuovamente, si registra un accumulo tra le profondità di -1,5 e -3 m, con uno spessore di +0,5 m. Il profilo di seguito riportato rappresenta sperò soltanto la parte terminale di tali alternanze, pertanto esse risultano essere di minore entità (Fig. 8.70).

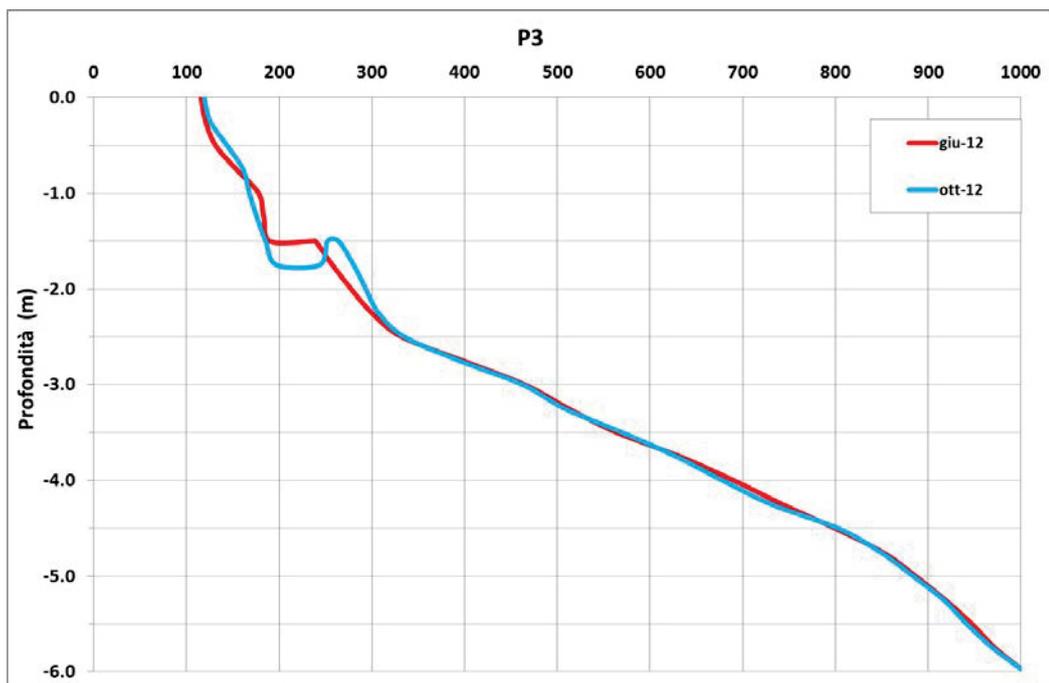


Fig. 8.70 - Profilo P03 riportante il confronto tra il rilievo di Giugno 2012 e quello di Ottobre 2012.

Le celle 3 e 5, invece, registrano un trend erosivo dalla linea di riva fino alla batimetrica di -1,5 m ed un accumulo tra -1,5 e -2m.

E' interessante osservare la formazione di una nuova barra nel tratto settentrionale della cella 3, alta circa 0,55 m ed ubicata alla profondità di -2,5 m (Fig. 8.71). Procedendo verso Sud, la barra è ancora presente, nella stessa posizione rilevata in Giugno 2012, e si rilevano inoltre altre ondulazioni del fondale verso il largo (Fig. 8.72).

In prossimità del reef, i fondali sembrano oramai stabili (Fig. 8.73), ma si osserva una zona in erosione subito al largo dei moduli più meridionali della struttura (cella 6, Fig. 8.74).

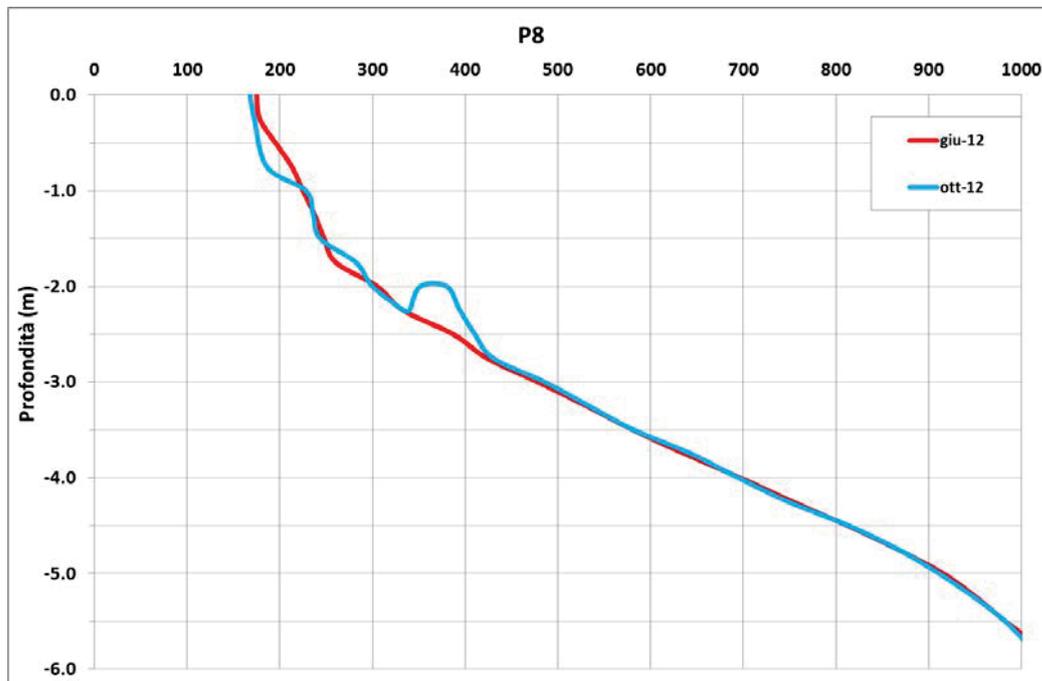


Fig. 8.71 - Profilo P08 riportante il confronto tra il rilievo di Giugno 2012 e quello di Ottobre 2012.

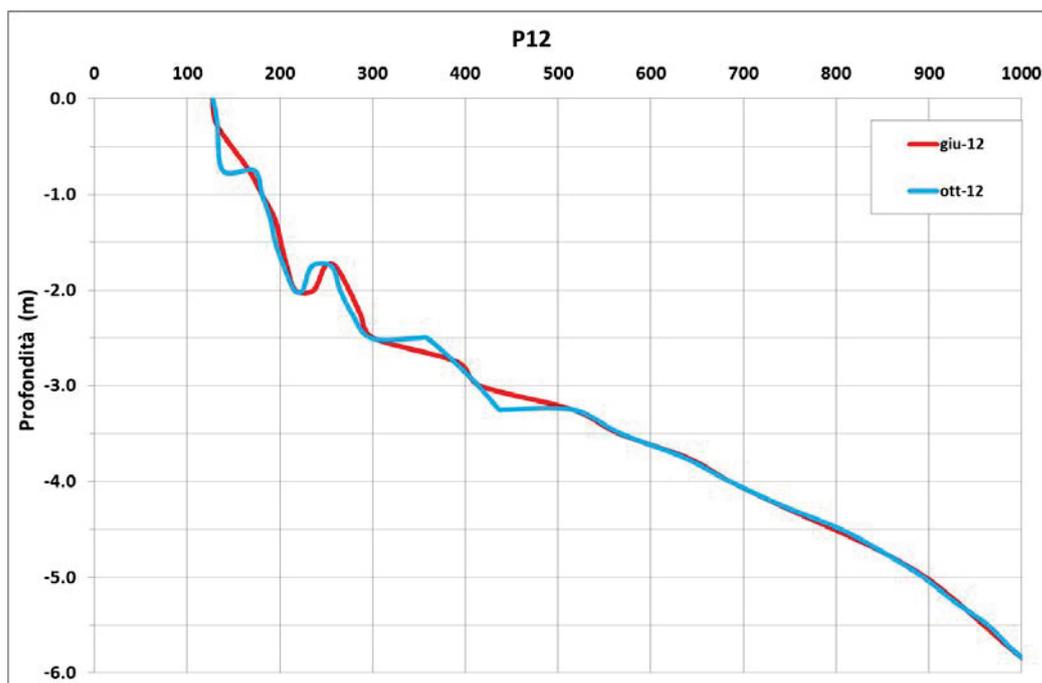


Fig. 8.72 - Profilo P12 riportante il confronto tra il rilievo di Giugno 2012 e quello di Ottobre 2012.

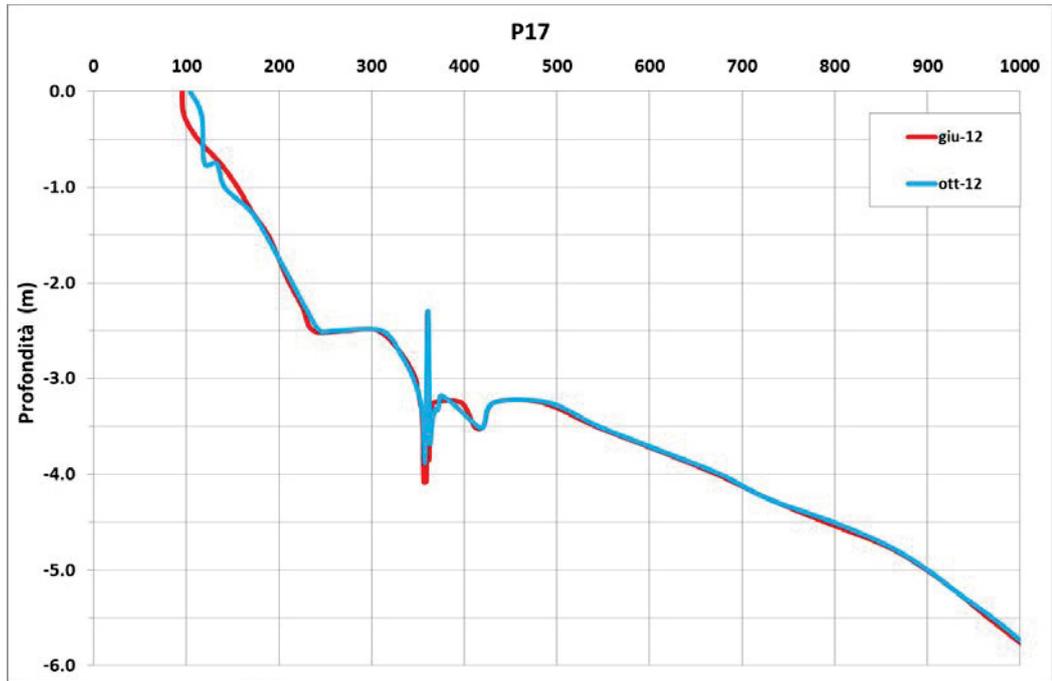


Fig. 8.73 - Profilo P17 riportante il confronto tra il rilievo di Giugno 2012 e quello di Ottobre 2012.

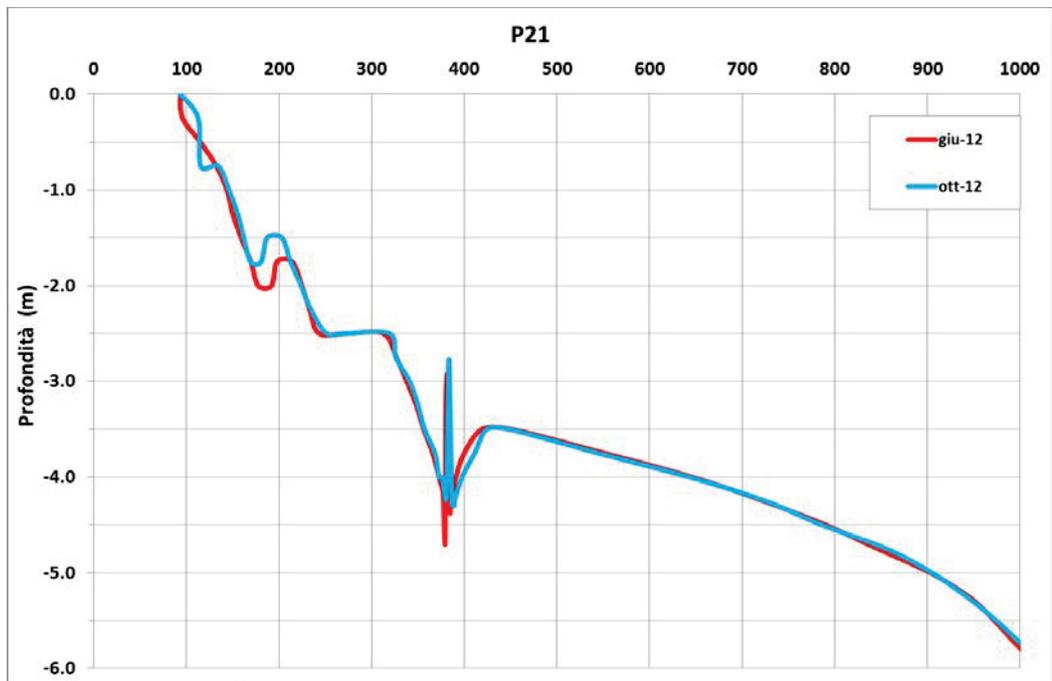


Fig. 8.74 - Profilo P21 riportante il confronto tra il rilievo di Giugno 2012 e quello di Ottobre 2012.

Nella cella 5, la barra rilevata in Giugno sembra essere migrata verso costa di 15 m circa. La sua morfologia però sembra essere inalterata, così come la sua altezza.

Infine, in prossimità della barriera in massi (cella 7), vi è una zona in sollevamento con variazioni medie di +0,25 - +0,5 m.

Dal computo volumetrico, il bilancio sedimentario è pressoché nullo, in quanto si stima una perdita meno di 1.000 m<sup>3</sup> in un'area di oltre 1,5 milioni di m<sup>3</sup> (Tab. 8.16).

Le celle esterne ed in particolare le celle 4, 6 e 7 evidenziano la deposizione di circa 2.000 m<sup>3</sup> di sabbia su ognuna, quasi completamente compensata dalla perdita, nella cella esterna settentrionale, di circa -4.500 m<sup>3</sup>.

Le celle interne, ed in particolare la 1 e la 3, mostrano variazioni volumetriche poco significative, mentre la cella 5 è quella che evidenzia la perdita maggiore di sedimento (circa -2.000 m<sup>3</sup>, Tab. 8.17).

Giugno 2012 - Ottobre 2012		
VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
-979	1.527.801	0,00

Tab. 8.16 - Computo volumetrico per il periodo Giugno 2012 – Ottobre 2012.

Giugno 2012 - Ottobre 2012								
Celle		1	2	3	4	5	6	7
TOTALE	m <sup>3</sup>	+489	-4.568	-692	+2.176	-2.222	+1.903	+1.934
	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,00	-0,01	-0,01	+0,01	-0,02	+0,01	-0,01

Tab. 8.17 - Computo volumetrico per il periodo Giugno 2012 – Ottobre 2012, suddiviso per celle.

### 8.1.2.2 Analisi morfologiche di dettaglio del reef artificiale

L'elaborazione tridimensionale del rilievo eseguito con tecnologia multi-beam (da ora MBES) permette di analizzare in maniera molto dettagliata la morfologia del *reef* artificiale e la variazione, lo spostamento o la rottura dei singoli moduli nel tempo. Sono stati eseguiti due rilievi MBES, uno nel mese di Maggio 2011, ad un anno di distanza dalla fine dei lavori, ed un altro nel mese di Giugno 2012 (Fig. 8.75, dettaglio in Appendice A)

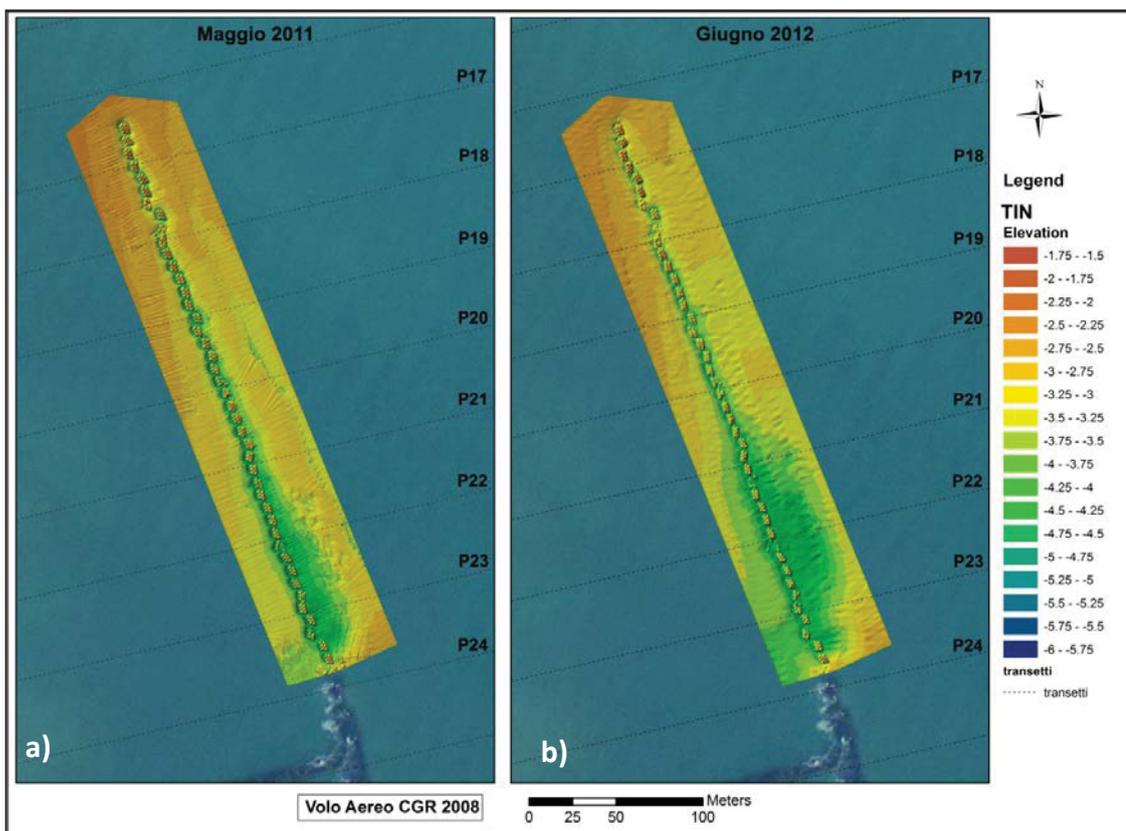


Fig. 8.75 - Modelli 3D dei rilievi multibeam del reef artificiale eseguiti in Maggio 2011 (a) ed in Giugno 2012 (b).

Si osserva un andamento delle batimetriche fortemente influenzato dal *reef*; procedendo verso sud esse si avvicinano progressivamente a riva e si flettono in corrispondenza della testa della barriera in *reef*. Lungo tutta la struttura del *reef* i fondali si sono approfonditi con un trend che aumenta procedendo da Nord verso Sud,

raggiungendo in corrispondenza dei moduli più meridionali i -4,7 m di profondità. Verso il largo, oltre la batimetrica dei 4 m, le isobate tendono a ristabilire la loro conformazione naturale.

Il rilievo MBES ha permesso di individuare e cartografare ognuno dei 44 moduli (numerati da Sud verso Nord).

Osservando la mappa 3D del rilievo di Maggio 2011, già dopo un anno dalla loro messa in opera è evidente uno spostamento dei moduli rispetto ad un asse longitudinale: alcuni sembrano ruotati ed altri completamente fuori asse. Analizzando nel dettaglio le morfologie 3D dei singoli moduli, si osservano inoltre dei parziali danneggiamenti, in particolare nel loro lato verso mare.

Le quote della parte sommitale dei vari moduli non sono costanti, ma si approfondiscono procedendo da Nord verso Sud, passando da circa -2.3 m di sommergenza ad oltre -3.3 m per i moduli meridionali.

Per quanto riguarda l'assetto dei fondali si evidenzia un approfondimento in prossimità dei moduli sia verso mare che verso terra, con una zona in abbassamento maggiormente estesa verso mare e che aumenta procedendo da nord verso sud, passando da quote di circa -3,75 m a -4,25 m. Questa escavazione ha una larghezza *cross-shore* in media di 30 m dal *reef*, oltre la quale il fondale torna a salire fino alla quota naturale (Fig. 8.75a).

Il rilievo eseguito nell'anno successivo (Giugno 2012) mette in risalto la persistenza del trend erosivo alla base dei moduli che comporta un ulteriore abbassamento dei fondali che nella porzione settentrionale si limita ad una decina di centimetri, ma che più a meridione arriva fino a -0,5 m (Fig. 8.75b).

Il rilievo di Giugno 2012 mostra un allargamento della zona in erosione che raggiunge un'ampiezza *cross-shore* massima di oltre 60 m nella porzione meridionale, tra i profili P21 e P23. Inoltre il rilievo mette in luce anche numerose rotture dei moduli ed il dislocamento delle piastre. Spesso, le rotture si sono verificate nel lato mare della struttura, molto evidenti a meridione ma presenti anche nel tratto settentrionale.

La variazione delle quote dei fondali (Fig. 8.76) in corrispondenza del *reef* evidenziano in particolare una zona molto estesa tra il P20 ed il P23 in cui, sia nel lato verso costa che in quello verso il largo, gli abbassamenti hanno superato il metro.

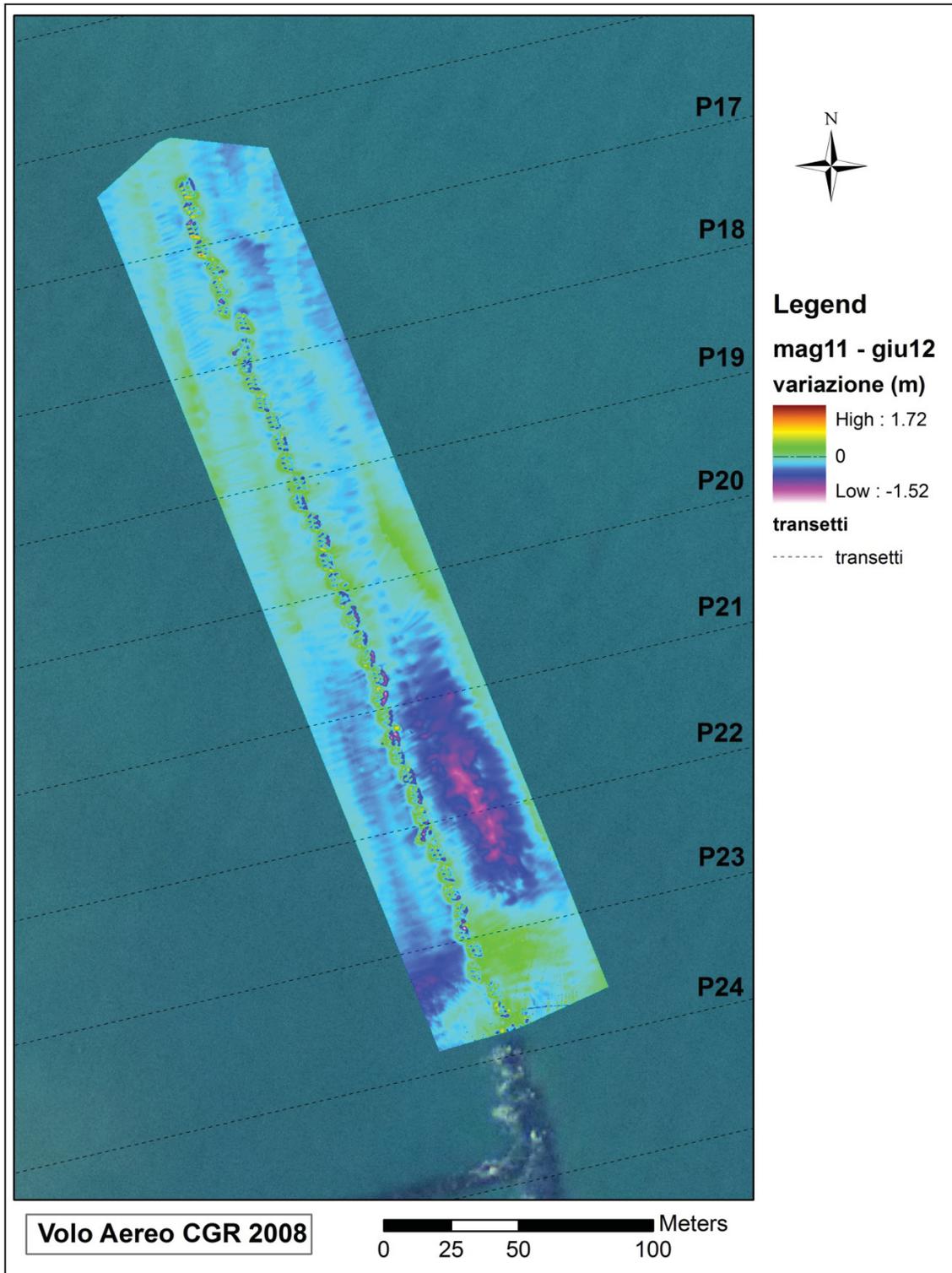


Fig. 8.76 - Mappa delle variazioni in quota da Maggio 2011 a Giugno 2012.

Questi abbassamenti hanno una forma allungata e parallela al *reef*; la fascia in erosione verso il largo ha una lunghezza di 120 m ed una larghezza di 35 m circa, mentre la fascia verso costa ha una lunghezza di circa 150 m ed un'ampiezza di 30 m, che si allarga però in prossimità delle opere in massi.

In generale le variazioni in quota sono per lo più comprese entro i -0,3 m e soltanto il 15% dell'area presenta delle variazioni positive entro i +15 cm (70%, Fig. 8.77).

Tali variazioni positive sono riscontrate nell'accumulo già osservato in precedenza al largo del *reef* in corrispondenza del P23, ma si è osservato un trend deposizionale anche più a Nord, dove tali accumuli di una decina di centimetri assumono una forma allungata subparallela a costa.

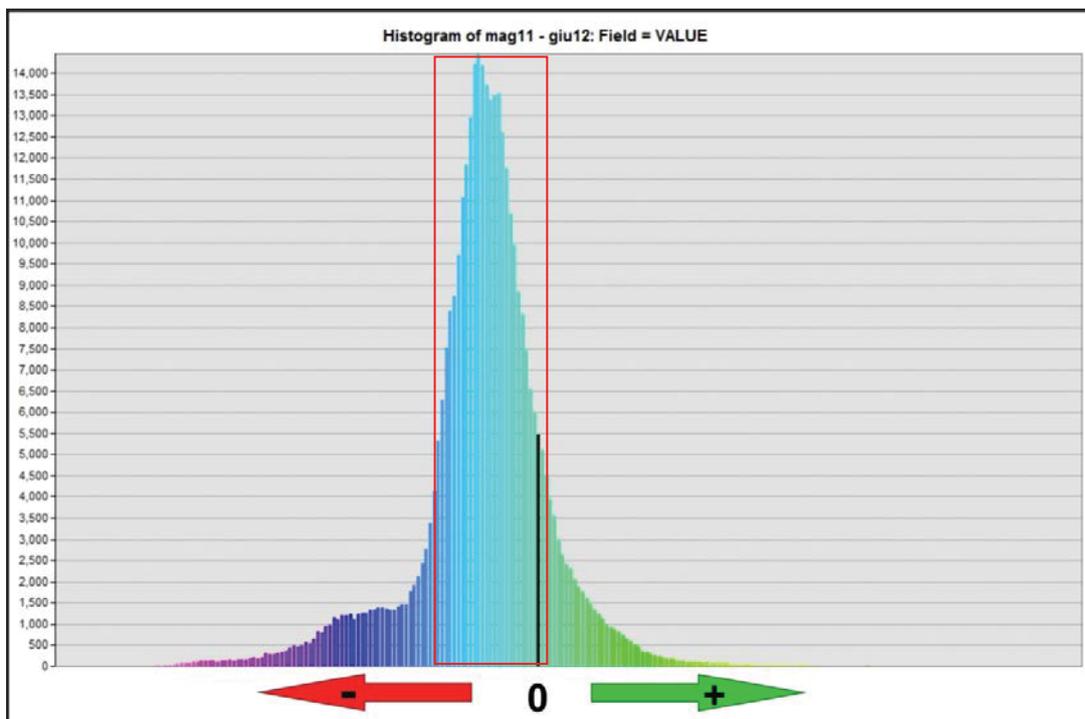


Fig. 8.77 - Istogramma delle classi di frequenza relative alla variazione in quota riscontrate.

## 8.2 Analisi sedimentologica

Durante il periodo di studio sono stati effettuati 3 campionamenti sedimentologici: in Dicembre 2010, in Maggio 2011 ed in Ottobre 2012. Nella prima e nella terza campagna sono stati raccolti campioni in tutta l'area indagata, lungo 11 profili. Durante la seconda campagna, invece, è stata campionata la sola area di intervento, tra il P06 ed il P24 (6 profili). L'ubicazione dei campioni raccolti, le tabelle riportanti i parametri tessiturali e le mappe sedimentologiche sono riportate in Appendice C.

### 8.2.1 Analisi tessiturale dei campioni prelevati in Dicembre 2010

#### Spiaggia emersa

La spiaggia emersa è costituita da sedimenti sabbiosi con percentuali prossime a 100%, caratterizzate da un diametro medio di 2,05  $\phi$  (sabbia fine) ed una classazione media pari a 0,45  $\phi$  (ben classati). La variazione del diametro medio è contenuta nell'ambito di 1  $\phi$  (Fig. 8.78) e quella della deviazione standard non supera  $\frac{1}{2}$   $\phi$ , pertanto non risulta nessuna variazione significativa in funzione della posizione di campionamento (spiaggia o battigia).

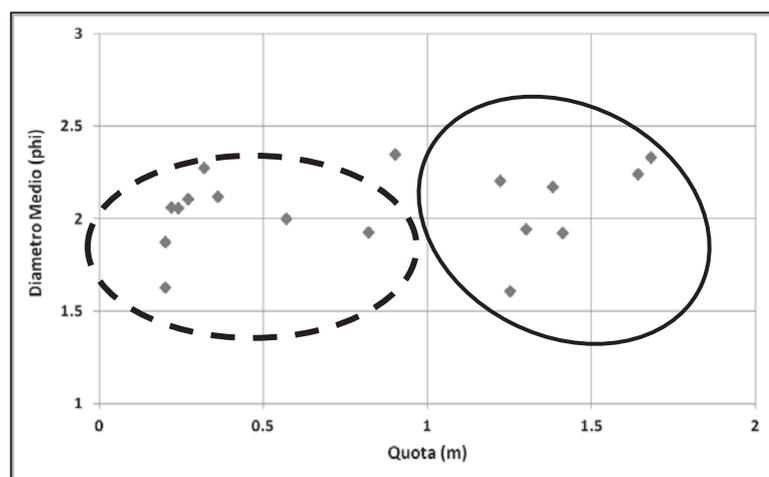


Fig. 8.78 - Variazione del diametro medio ( $\phi$ ) in funzione della quota di campionamento (m). I campioni racchiusi nell'ellisse in tratteggio provengono dalla battigia mentre gli altri dalla spiaggia emersa.

### Spiaggia sommersa

I campioni di sedimento prelevati sui fondali tra le isobate -1 e -6 m presentano un contenuto medio di sabbia di 94,6 % (max 99,9 e min 33,7 %), un valore medio del diametro di 3,0  $\phi$  (max 1,9  $\phi$  e min 6,0  $\phi$ ) ed una classazione media di 0,48  $\phi$ . Ciò evidenzia che i sedimenti superficiali sono generalmente costituiti da sabbia fine o molto fine, moderatamente ben classata, anche se vi sono aree con depositi di sabbia media o di silt molto fine.

La percentuale di sabbia sino all'isobata -4 m/-5 m presenta sempre percentuali superiori al 80 % e solo dopo tale profondità si evidenziano consistenti diminuzioni (Fig. 8.79): ciò determina una correlazione con la profondità espressa da un  $R^2$  di 0,69.

Tale valore è influenzato da un campione ubicato alla profondità -7 m, nella profonda escavazione generatasi nel vecchio varco tra le barriere oggi chiuso. Eliminando tale valore, l' $R^2$  è 0,64, suggerendo comunque una buona correlazione. Sino all'isobata di 4 m i sedimenti sono costituiti da sabbia fine, tra quella dei 4 e 5 m da sabbia fine e molto fine ed infine oltre quella dei 5 m da sabbia molto fine. Soltanto il campione prelevato alla -7 m presenta del sedimento ricco in silt (Fig. 8.80), ma esso è ubicato in una escavazione dovuta ad un varco tra le barriere, oggi chiuso, dove ora dominano i processi gravitativi. Eliminando tale valore dal grafico la retta di correlazione ha  $R^2$  anche più alto (0,68) rispetto a quello calcolato includendolo (0,63).

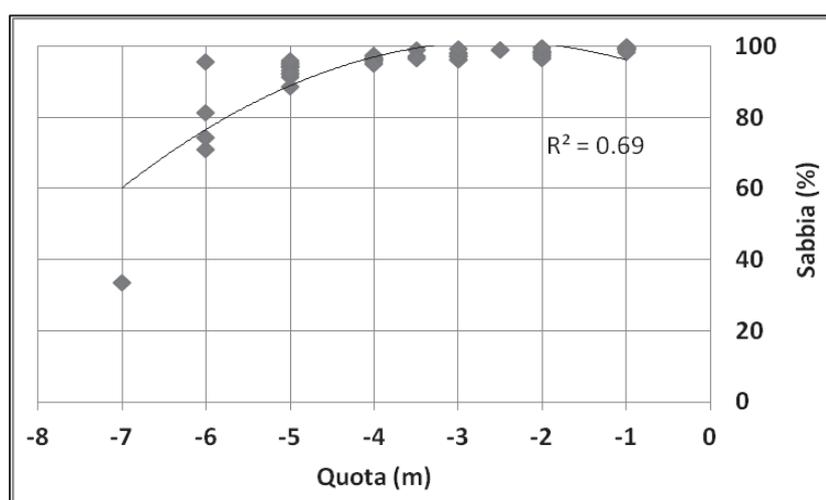
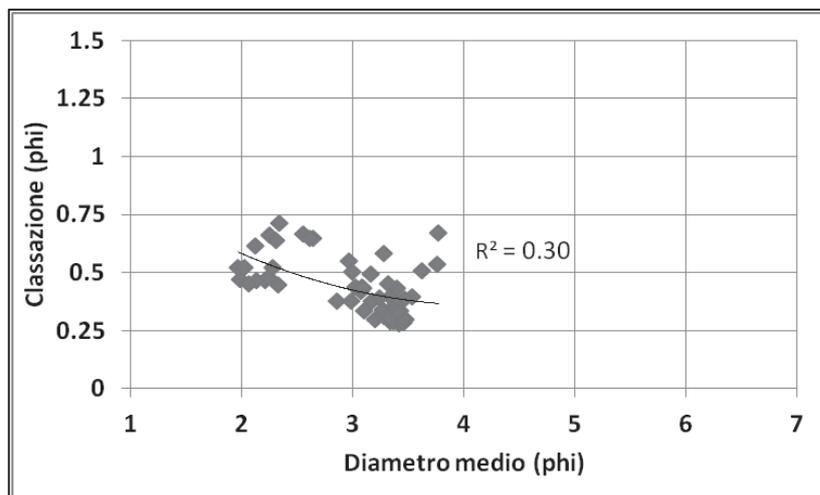
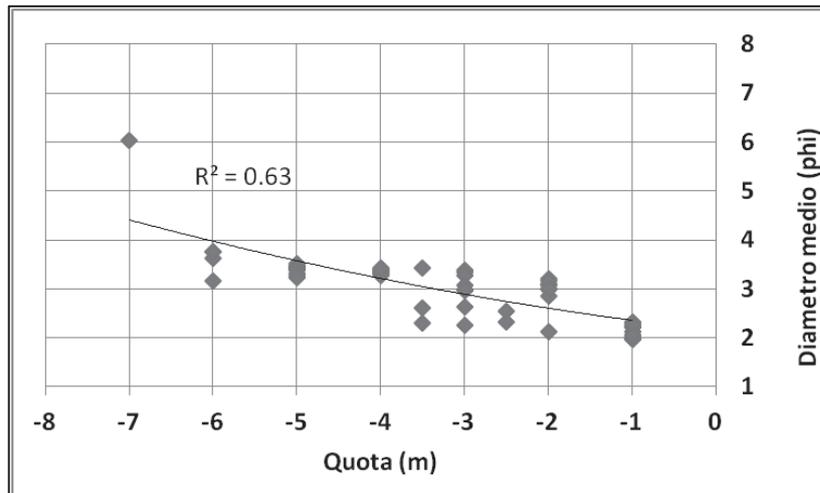


Fig. 8.79 - Variazione della percentuale di sabbia in funzione della profondità di campionamento.

Valori di correlazione poco significativi ( $R^2=0,30$ ) vengono evidenziati dal confronto tra il diametro medio e la classazione, compresa tra 0,25 e 0,75  $\phi$  ed in media 0,44  $\phi$ , corrispondente ad un sedimento ben classato (Fig. 8.81), indice di una buona selezione da parte del moto ondoso. In questo grafico non è stato inserito il campione ubicato alla profondità di -7m, perché influenza troppo la restituzione.



A 7 mesi dall'intervento la distribuzione del diametro medio è fortemente influenzata dal ripascimento sommerso (Fig. 8.82). Infatti mentre nella zona a Nord, non interessata dall'intervento, i sedimenti hanno una distribuzione naturale, con un

diametro medio più grossolano sulla spiaggia emersa ( $Mz < 2 \phi$ ) che diminuisce verso il largo fino a  $3,5-4\phi$ , tra il pennello "ruvido" e le barriere foranee in massi, si nota un disturbo importante tra le batimetriche di 2,5 e 3,5 m.

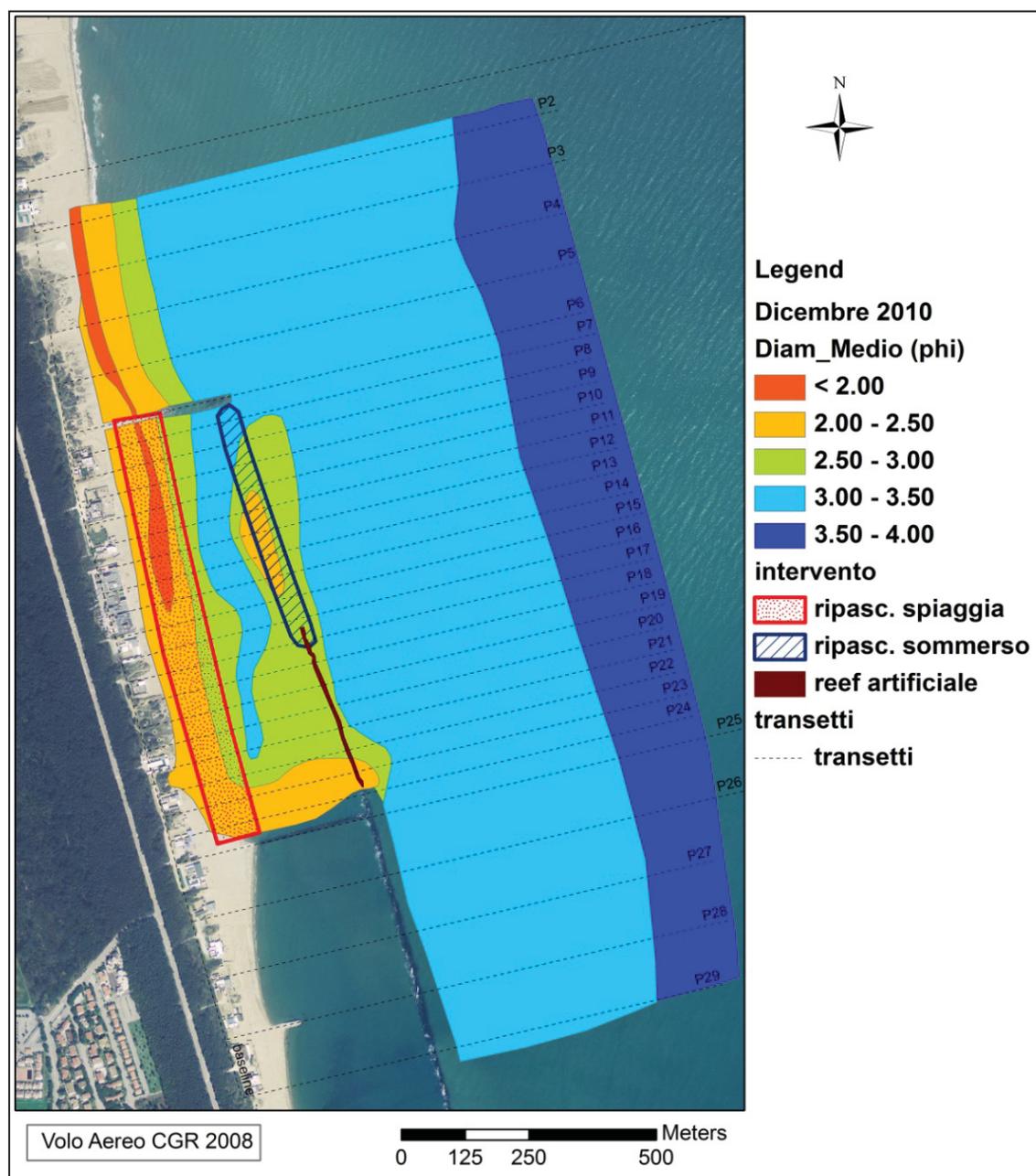


Fig. 8.82 - Distribuzione areale del diametro medio in Dicembre 2010.

La zona in cui è stato eseguito il ripascimento sommerso era caratterizzata da sedimenti con  $Mz = 3-3,5 \phi$ , mentre dopo l'intervento il diametro medio risulta compreso tra i  $2,5-3 \phi$  e, in corrispondenza della *feeder berm*, si rinvenivano sedimenti

con diametro medio maggiore ( $2 - 2,5 \phi$ ). Più a Sud, si osserva una lingua di sedimento con  $Mz < 2,5 \phi$  che si allunga perpendicolarmente a costa, lungo il pennello in massi fino ad oltre la barriera foranea.

Anche la classazione del sedimento risulta essere disturbata dall'intervento di ripascimento(Fig. 8.83).

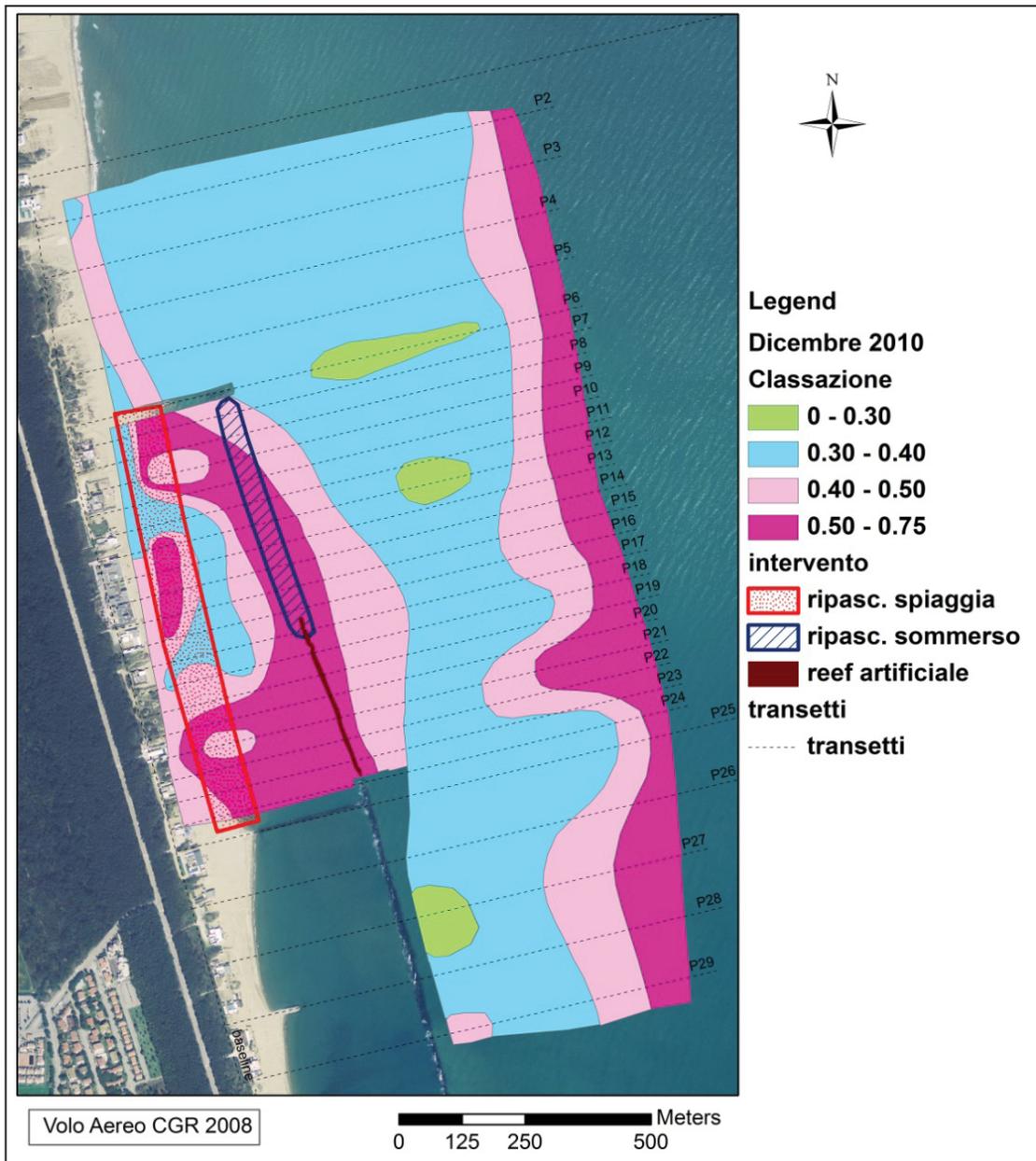


Fig. 8.83 - Mappa della distribuzione areale della classazione in Dicembre 2010.

I sedimenti molto ben classati (da 0,3 a 0,4  $\phi$ ) si distribuiscono tra le batimetriche di 0,5 e 5 m per tutto il tratto indagato, ad eccezione della zona compresa tra il pennello “ruvido” e le barriere foranee, dove si osservano sedimenti moderatamente ben classati. Anche oltre la profondità dei 5 m i sedimenti campionati risultano essere peggio classati rispetto alla zona di surf (0,5 – 0,75  $\phi$ )

### 8.2.2 Analisi tessiturale dei campioni prelevati in Maggio 2011

---

I campioni di sedimento prelevati sui fondali tra le isobate -2 e -4 m presentano un contenuto medio di sabbia di 97.9 % (valore massimo 99,9 e minimo 93.5 %). I sedimenti superficiali sono generalmente costituiti da sabbia fine o molto fine (Mz medio 3,0  $\phi$ , max 2,3  $\phi$  e min 3,3  $\phi$ ), mediamente classata (0,4  $\phi$ ).

Dalla mappa della distribuzione del diametro medio (Fig. 8.84) si osserva una distribuzione piuttosto omogenea della distribuzione del diametro medio tra le batimetriche di 2 e 4 m.

Il sedimento a granulometria più grossolana (2,5 – 3  $\phi$ ) interessa oltre l’area di versamento, anche i fondali più vicini a costa; oltre la profondità dei 3,5 m si rinviene un diametro medio compreso tra i 3 ed i 3,5  $\phi$ .

Per quanto riguarda la classazione, dalla mappa in Fig. 8.85 si osserva una fascia di sedimenti molto ben classati (0,3 - 0,4  $\phi$ ) che dal largo si estende verso la zona di intervento. Soltanto la zona prossima al pennello a Nord presenta sedimenti peggio classati. I fondali protetti dall’intervento sono caratterizzati da sedimenti moderatamente ben classati (0,5 – 0,75  $\phi$ ).

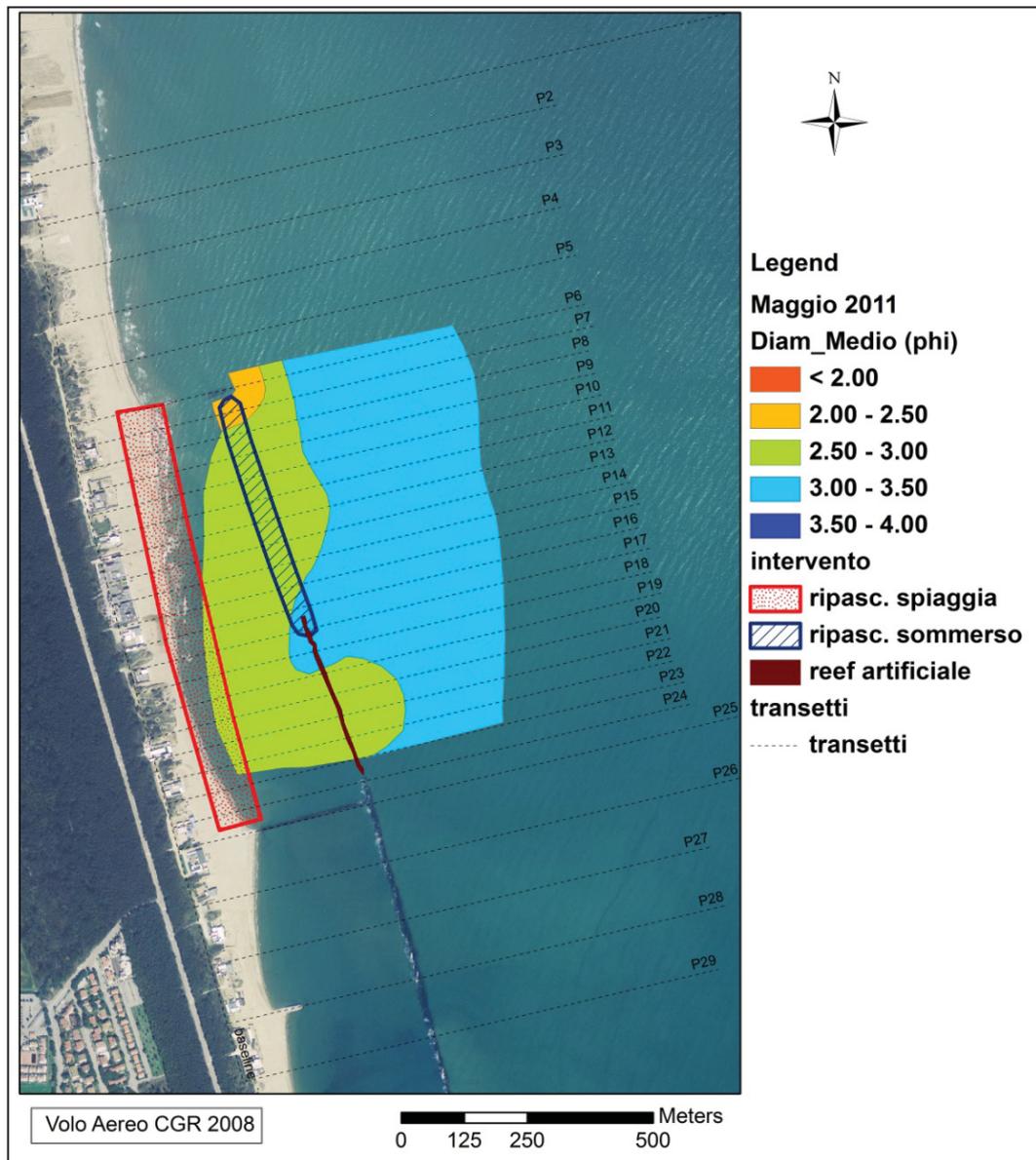


Fig. 8.84 - Mappa della distribuzione areale del diametro medio in Maggio 2011 (dopo 1 anno).

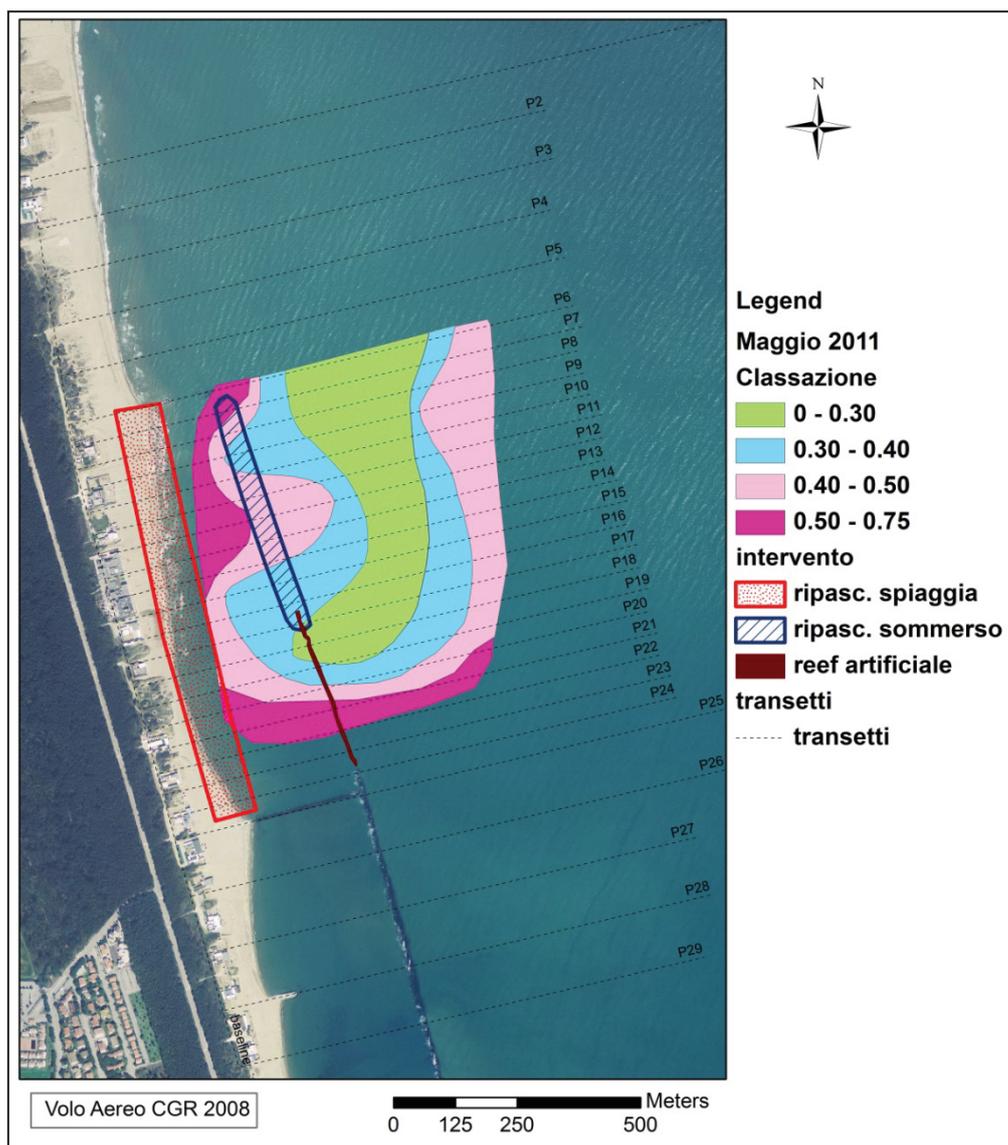


Fig. 8.85 - Mappa della distribuzione della classazione in Maggio 2011 (dopo 1 anno).

### 8.2.2.1 Confronto tessiturale tra Dicembre 2010 e Maggio 2011

E' stata confrontata la tessitura riscontrata nei campioni prelevati a Dicembre 2010 con quella riscontrata on Maggio 2011, per quanto riguarda la sola spiaggia sommersa relativa all' area di intervento (P06-P24) tra le profondità di -2 e -4 m.

Dal confronto si osserva un aumento del contenuto di sabbia nei campioni più spiccato alle profondità dei 2 e 3 m (oltre il 97,6 %). Alla profondità di 4 m invece si osserva una distribuzione più ampia delle percentuali di sabbia (da 93,5 a 97,5 %).

Migliora anche la correlazione con la profondità, passando da un  $R^2$  di 0,42 a 0,57 (Fig. 8.86).

Il diametro medio così come la classazione non variano molto da Dicembre a Maggio, infatti il diametro medio passa da 2,94 a 3,01  $\phi$  e la classazione da 0,46 a 0,41  $\phi$ . Si osserva però una miglior correlazione del diametro con la profondità, con  $R^2$  di 0,65 (Fig. 8.87).

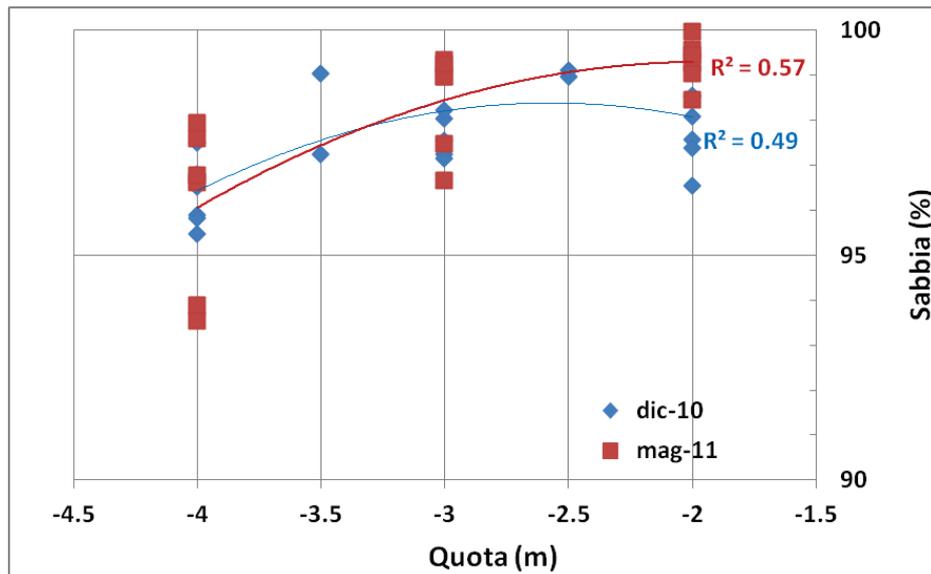


Fig. 8.86 - Variazione della percentuale di sabbia in funzione della profondità di campionamento (m).

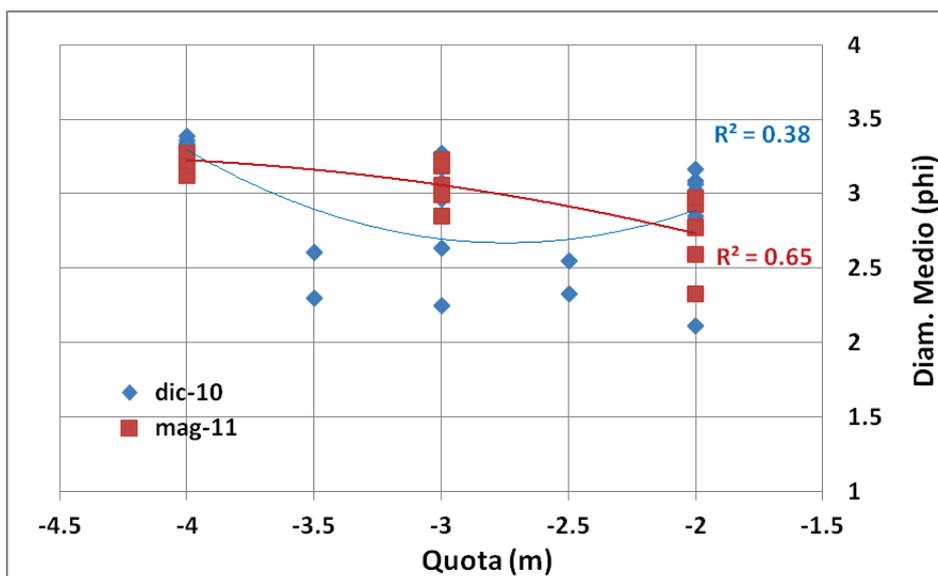


Fig. 8.87 - Variazione del diametro medio ( $\phi$ ) in funzione della profondità di prelievo (m).

Per la classazione i dati mostrano invece una diminuzione della loro correlazione in funzione della profondità (Fig. 8.88).

Infine, si osserva un peggioramento della correlazione tra la distribuzione del diametro medio e la classazione (Fig. 8.89). Il sedimento sembra infatti meglio classato e una variabilità del diametro minore.

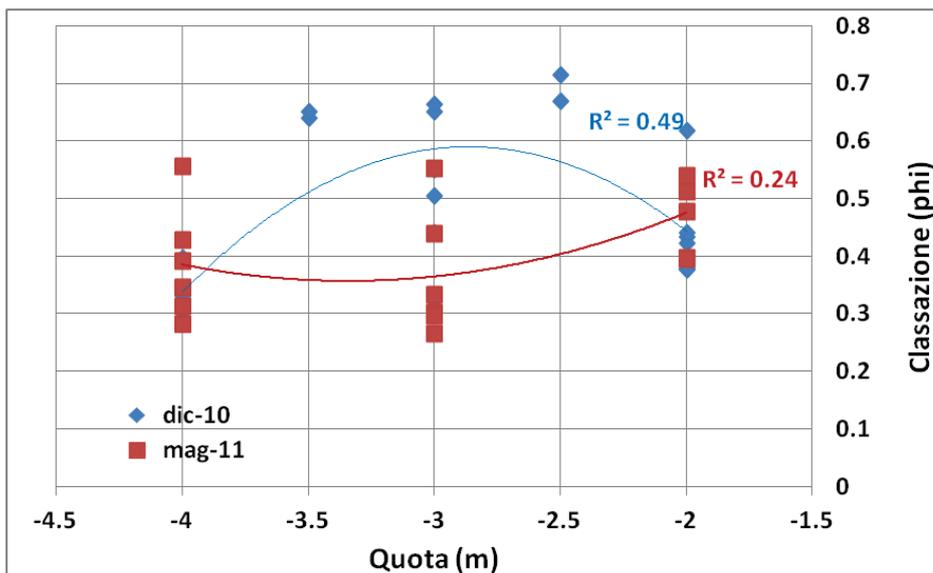


Fig. 8.88 - Distribuzione della classazione ( $\phi$ ) alle varie profondità (m).

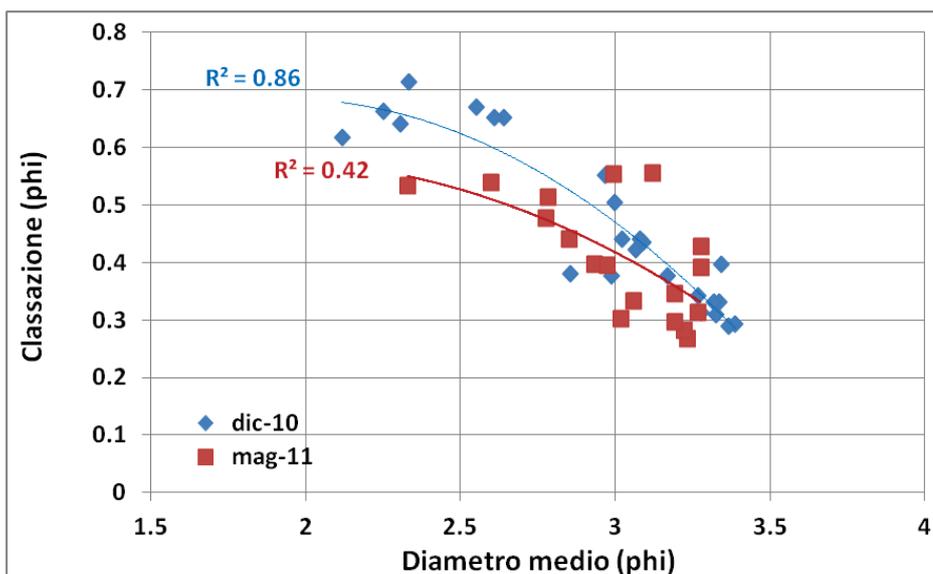


Fig. 8.89 - Variazione del diametro medio ( $\phi$ ) in funzione della classazione ( $\phi$ ).

Si può dunque osservare una forte articolazione e complessità nella distribuzione del diametro medio e della classazione nell'area interessata dall'intervento.

In generale si osserva come i sedimenti versati abbiano determinato un disturbo nella tessitura della sabbia nativa, comportando un 'incremento della dimensione media e della classazione dei granuli rispetto alla situazione naturale osservabile nel tratto a nord del pennello "ruvido".

Il sedimento versato ( $Mz = 2,2 \phi$ ;  $\sigma = 0,6 \phi$ ), corrispondeva a sabbia fine moderatamente ben classata, mentre i sedimenti nativi prima dell'intervento avevano un diametro medio di  $3,3 \phi$  e una classazione pari a  $0,3 \phi$  (sedimenti molto ben classati). Per cui la peggior cernita dei sedimenti che si riscontra nell'area di intervento a Dicembre 2010 e poi più ampia a Maggio 2011 può essere causata dalla migrazione verso riva dei sedimenti che costituivano il versamento.

Da Dicembre a Maggio si nota una generale omogeneizzazione nella distribuzione dei diametri nell'area di intervento (tra  $2,5$  e  $3,0 \phi$ ) ed un miglioramento della distribuzione delle granulometrie alle varie profondità, evidenziando un trend che tende a ristabilire un equilibrio tra la dimensione dei sedimenti ed il regime idrodinamico.

Il sedimento rimane comunque ancora moderatamente classato evidenziando una deposizione non naturale e fortemente legata alle caratteristiche locali e dunque all'avvenuto intervento di difesa.

### 8.2.3 Analisi tessiturale dei campioni prelevati in Ottobre 2012

---

#### **Spiaggia emersa**

La spiaggia emersa è costituita da sedimenti sabbiosi con percentuale prossime a 100, caratterizzate da un diametro medio di  $1,85 \phi$  (sabbia fine -  $0,28$  mm) ed una classazione media pari a  $0,44 \phi$  (sedimenti ben classati).

La variazione del diametro medio è contenuta nell'ambito di  $1 \phi$  (max  $1,27$ , min  $2,24$ ) e quella della deviazione standard non supera  $0,3 \phi$ . Data l'uniformità dei valori

di questi due parametri non risulta nessuna variazione significativa in funzione della quota di campionamento né della sua ubicazione (spiaggia o battigia) (Fig. 8.90).

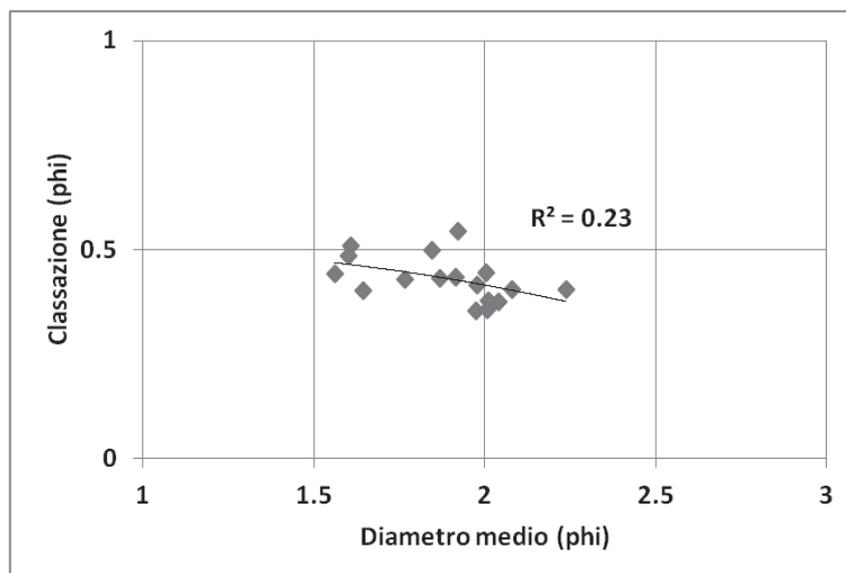


Fig. 8.90 - Variazione del diametro medio ( $\phi$ ) in funzione della classazione ( $\phi$ ).

### **Spiaggia sommersa**

I campioni di sedimento prelevati sui fondali tra le isobate -1 e -6 m presentano un contenuto medio di sabbia di 94,7 % (valore massimo 99,7 e minimo 68,7 %), un valore medio del diametro di 3,0  $\phi$  (massimo 1,3  $\phi$  e minimo 3,8  $\phi$ ) ed una classazione media di 0,45  $\phi$ . Ciò evidenzia che i sedimenti superficiali sono generalmente costituiti da sabbia fine o molto fine, moderatamente ben classata (Fig. 8.91).

La percentuale di sabbia sino all'isobata -4 m/-5 m presenta sempre percentuali superiori al 90 % e solo dopo tale profondità si evidenzia una diminuzione ( $R^2=0,85$ ).

Valori di correlazione poco significativi ( $R^2=0,36$ ) vengono evidenziati dal confronto tra il diametro medio e la classazione, la quale è compresa tra 0,28 e 0,95  $\phi$  ed in media 0,45  $\phi$ , corrispondente ad un sedimento ben classato (Fig. 8.92), indice di una buona selezione da parte del moto ondoso.

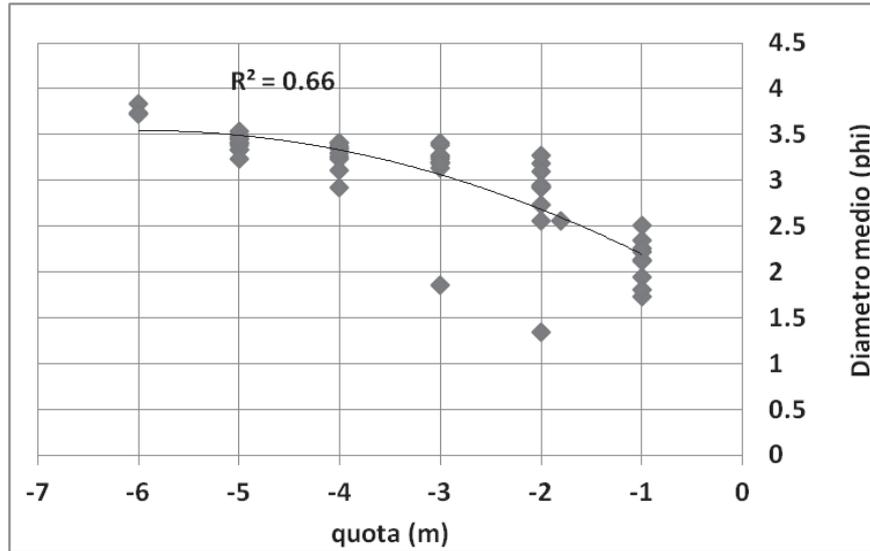


Fig. 8.91 - Variazione del diametro medio ( $\phi$ ) in funzione della profondità di prelievo (m).

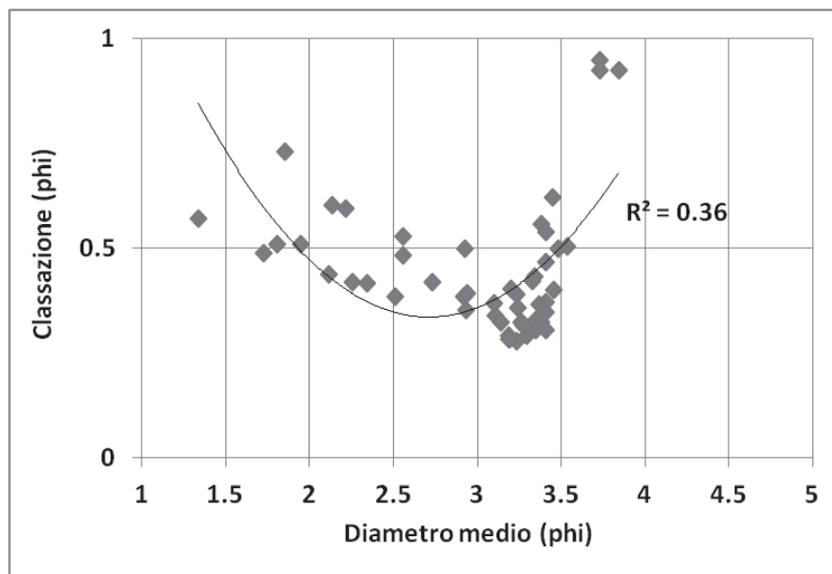


Fig. 8.92 - Variazione del diametro medio ( $\phi$ ) in funzione della classazione ( $\phi$ ).

Si osserva una distribuzione del diametro medio (dopo 29 mesi dall'intervento) che oramai non presenta più il disturbo creato dal ripascimento sommerso (Fig. 8.93).

Infatti l'andamento del diametro medio sembra essere piuttosto omogeneo e diminuisce le sue dimensioni con l'aumento della profondità. Tra i profili P16-P22, in corrispondenza della zona un cui è ubicato il *reef* artificiale (Fig. 8.93), il diametro medio risulta essere più sottile rispetto alle zone limitrofe, in quanto in questa zona le fasce di dimensioni omogenee nella distribuzione dei sedimenti si flettono verso costa.

La zona a settentrione del pennello "ruvido" mostra invece un diametro medio che tra il P02 ed il P06 sembra essere condizionato dalla presenza di una barra sommersa, mostrando la fascia di sedimento con  $Mz = 2.5 - 3.0 \phi$  che si allarga verso costa e verso il largo ma è interrotta da una lente con  $Mz$  di  $\frac{1}{2} \phi$  più sottile (probabilmente in nel truogolo).

Altro dato interessante è una fascia disposta perpendicolarmente a costa di sedimento con un diametro medio maggiore di circa  $1 \phi$  rispetto alla zona circostante che dalla riva si protrae lungo il pennello Sud fin oltre il *Tecnoreef* (Fig. 8.93).

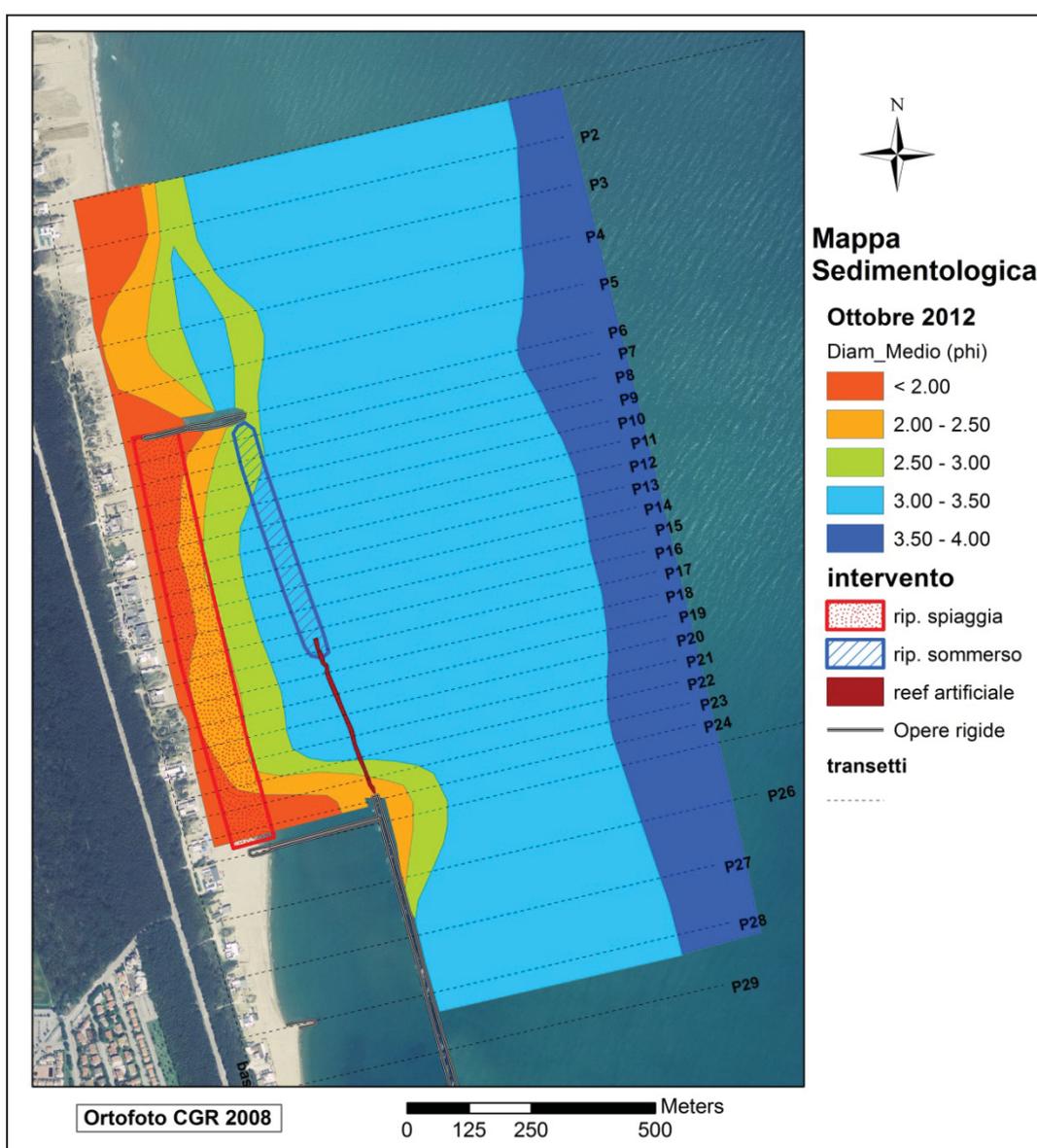


Fig. 8.93 - Mappa della distribuzione del diametro medio in Ottobre 2012 (dopo 29 mesi).

La Fig. 8.94 mostra un'ampia fascia tra le profondità di -2 e -4,5 m con una classazione molto buona del sedimento (da 0,3 a 0,4  $\phi$ ), mentre verso costa e verso il largo la classazione diminuisce. In particolare verso costa la classazione media è di 0,4-0,5  $\phi$ , mentre oltre la profondità di 5 m si osserva una classazione di 0,75-1  $\phi$  (moderatamente classati). Anche in questa mappa si osserva un andamento anomalo in prossimità del pennello Sud, in quanto vi è una lingua di sedimento peggio classato che si allunga dalla linea di riva verso il largo oltre il *Tecnoreef*.

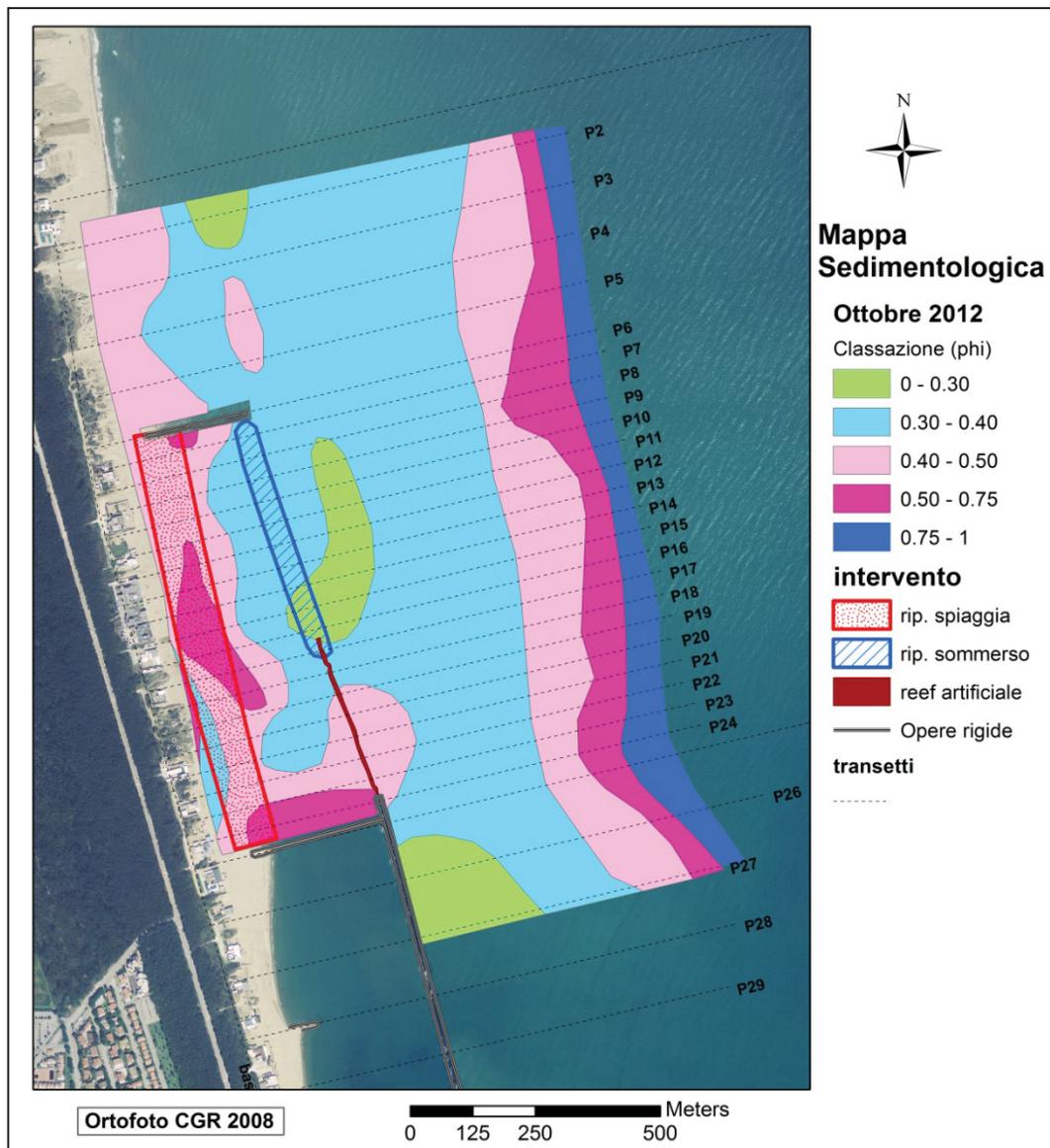


Fig. 8.94 - Mappa della distribuzione della classazione in Ottobre 2012 (dopo 29 mesi).

### 8.2.3.1 Confronto tessiturale tra Maggio 2011 e Ottobre 2012

Il confronto con la distribuzione granulometrica dei sedimenti campionati in Ottobre con quelli campionati in Maggio 2011 (17 mesi) è possibile solo per il tratto interessato dall'intervento, tra i profili P06-P24, tra le profondità di -2 e -4 m.

In generale si osserva una lieve diminuzione della percentuale di sabbia ed una migliore correlazione con la profondità (Fig. 8.95).

Il diametro medio sembra essere rimasto generalmente lo stesso da Maggio 2011 (3  $\phi$ ) a Ottobre 2012 (3,1  $\phi$ ) (Fig. 8.96) ma sembra essere meno correlato con la profondità.

La classazione del sedimento mostra un andamento del tutto simile a quello registrato l'anno precedente (Fig. 8.97), ma mediamente sembra essere meglio classato (0,37  $\phi$ ) rispetto a Maggio 2011 (0,41  $\phi$ ).

Infine il diametro medio ha una migliore correlazione con la classazione, sebbene la maggior parte dei valori siano piuttosto raggruppati ( $M_z=3-3.5 \phi$ ;  $\sigma=0.3-0.4 \phi$ ) (Fig. 8.98).

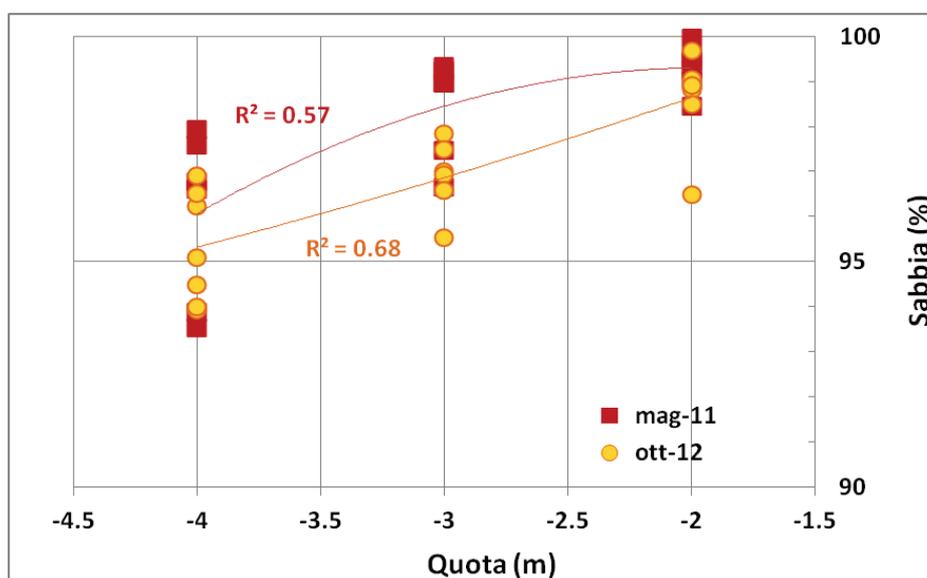


Fig. 8.95 - Variazione della percentuale di sabbia in funzione della profondità di campionamento (m).

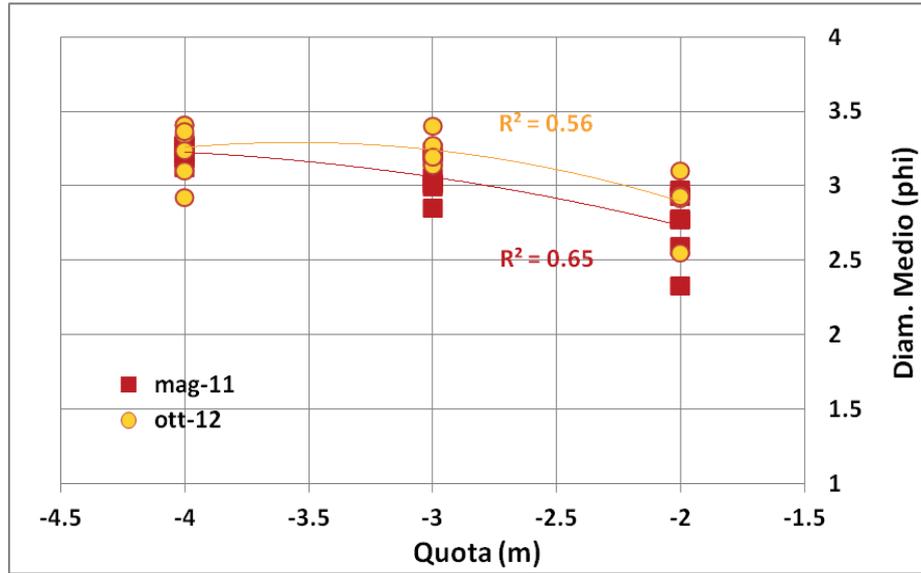


Fig. 8.96 - Variazione del diametro medio ( $\phi$ ) in funzione della profondità di prelievo (m).

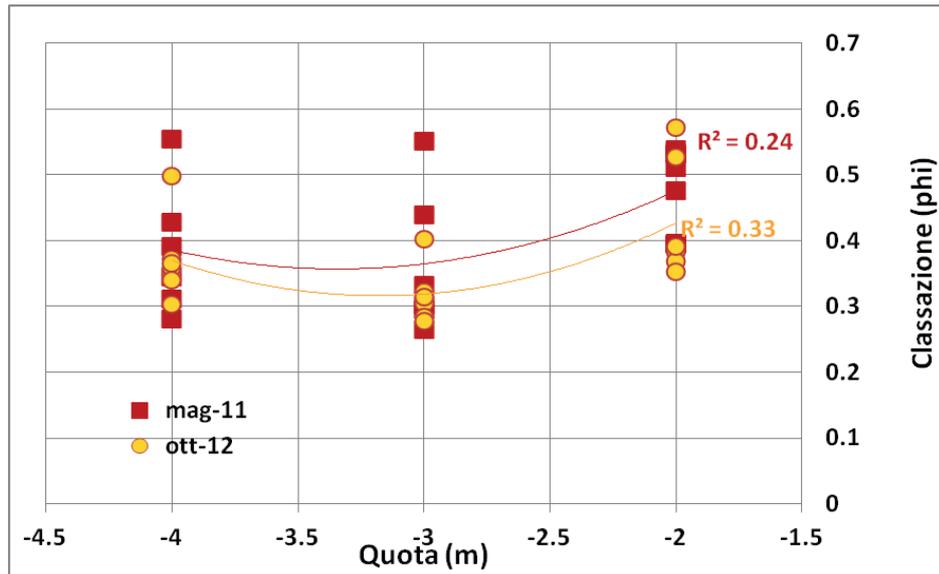


Fig. 8.97 - Variazione della classazione ( $\phi$ ) in funzione della profondità di prelievo (m).

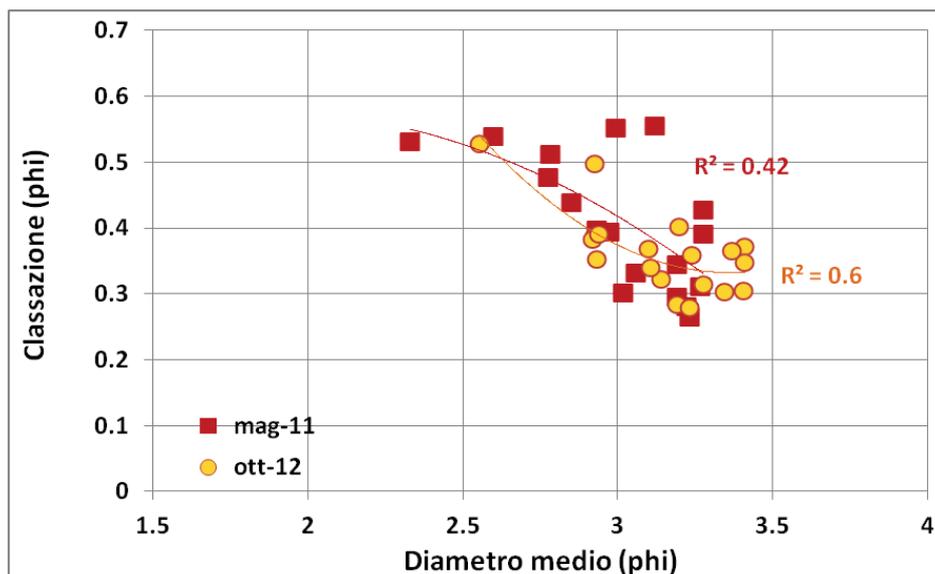


Fig. 8.98 - Variazione del diametro medio ( $\phi$ ) in funzione della classazione ( $\phi$ ).

Dal confronto delle mappe elaborate per i due periodi non si osservano particolari ed importanti variazioni. Si evidenziano soltanto due zone in cui si rilevano delle differenze: una, in corrispondenza del tratto in cui era stata realizzata la *feeder berm* fino alla parte settentrionale del *Tecnoreef*, dove il diametro medio diminuisce di circa  $\frac{1}{2} \phi$  e una seconda zona in prossimità del pennello Sud, dove si osserva un importante aumento della dimensione del diametro medio, in alcuni punti anche di  $1 \phi$ .

Si evidenzia inoltre una miglior classazione del sedimento nel tratto interessato dall'intervento, con la zona con valori tra  $0,4-0,5 \phi$  notevolmente aumentata. La fascia con sedimenti molto ben classati ( $<0,3 \phi$ ), ubicata oltre la zona d'intervento, sembra essersi ridotta. Da evidenziare infine un miglioramento della classazione nei fondali sottocosta passando da un valore in media di  $0,75-0,5\phi$  a  $0,4-0,5 \phi$ .

### 8.2.3.2 Confronto tessiturale tra Dicembre 2010 ed Ottobre 2012

Infine il confronto con la tessitura dei sedimenti campionati in Ottobre 2012 con quelli campionati a Dicembre 2012 (a distanza di quasi 2 anni), evidenzia gli stessi valori medi per contenuto di sabbia (95%), diametro medio ( $3 \phi$ ) e classazione ( $0,4 \phi$ ).

In particolare però si osserva una migliore correlazione del contenuto di sabbia con la profondità (Fig. 8.99).

Non si osservano invece variazioni nella distribuzione del diametro medio alle varie profondità, con solo due valori, ubicati in prossimità del pennello Sud che ad Ottobre risultano essere molto più grossolani ( $<2 \phi$ ) (Fig. 8.100).

Infine anche la variazione del diametro medio in funzione della classazione mostra un andamento del tutto simile a quello riscontrato in Ottobre (Fig. 8.101).

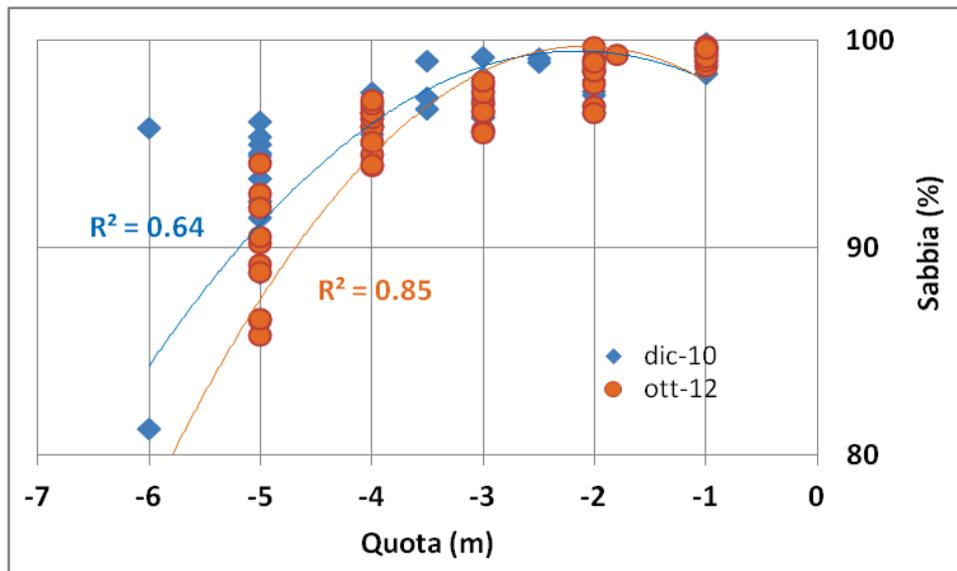


Fig. 8.99 - Variazione della percentuale di sabbia in funzione della profondità di campionamento (m).

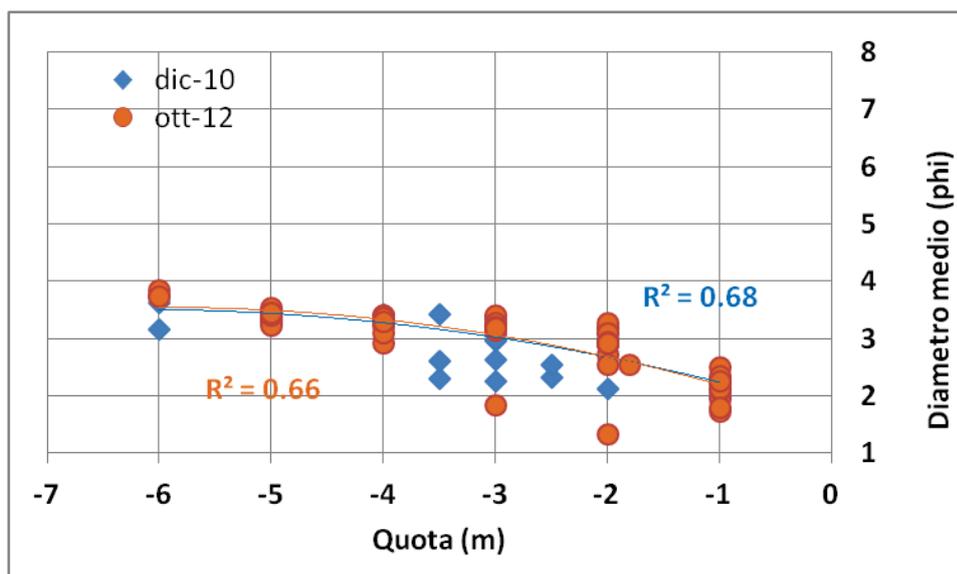


Fig. 8.100 - Variazione del diametro medio ( $\phi$ ) in funzione della profondità di prelievo (m).

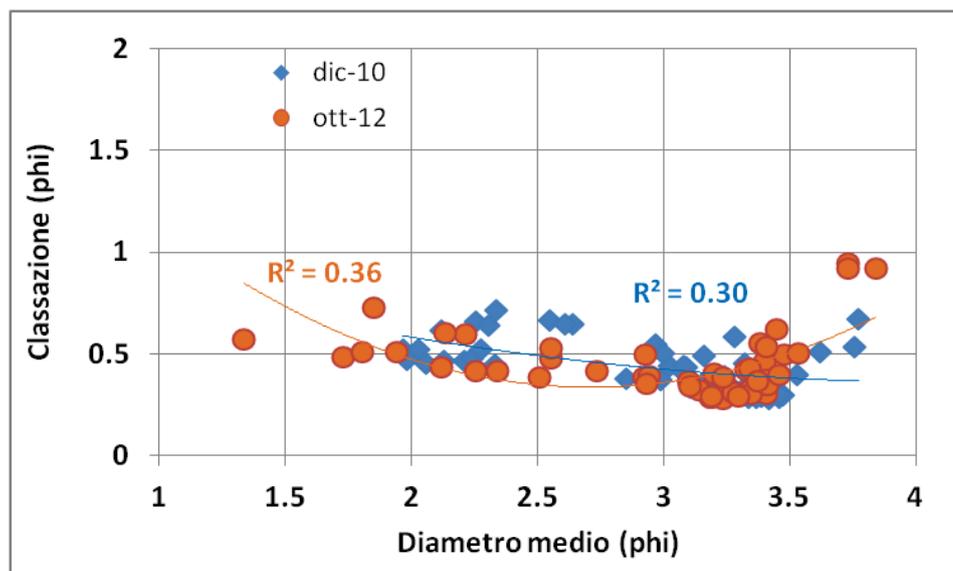


Fig. 8.101 - Variazione del diametro medio ( $\phi$ ) in funzione della classazione ( $\phi$ ).

Dalle mappe relative alla distribuzione del diametro medio (Fig. 8.82 e Fig. 8.93) e della classazione (Fig. 8.83e Fig. 8.94) di Dicembre 2010 e Ottobre 2012 si osserva una omogeneizzazione del fondale che sembra riprendere un andamento più naturale, dove il disturbo creato dall'intervento sembra non essere più presente.

La lingua di sedimento più grossolano osservata in Dicembre 2010 che dalla riva si estendeva perpendicolarmente a costa lungo il pennello Sud fin oltre il *Tecnoreef*, nel rilievo di Ottobre 2012 è caratterizzata da un diametro medio più grossolano di circa  $\frac{1}{2}$   $\phi$ . L'area interessata da tale anomalia, oltre il *Tecnoreef*, sembra essersi estesa più verso il largo e verso Sud lungo la barriera foranea.

Altro dato interessante è l'alternanza di fasce a sedimento più grossolano e più fine nella zona a settentrione del pennello "ruvido", in corrispondenza della posizione di una barra longitudinale. Infine si evidenzia l'aumento delle dimensioni medie del sedimento nella porzione di spiaggia sommersa in media di  $\frac{1}{2}$   $\phi$ .

Anche la distribuzione della classazione del sedimento mostra una miglior classazione del fondale su cui è stato realizzato l'intervento, passando da un intervallo di 0,5-0,75  $\phi$  a 0,3-0,4  $\phi$ . Soltanto a ridosso del pennello Sud si continua ad osservare una peggior classazione del sedimento (0,5-0,75  $\phi$ ) che interessa una zona più vasta oltre il *Tecnoreef*.

### 8.3 Analisi delle forzanti meteo-marine

Al fine del presente studio sono stati raccolti i dati di moto ondoso rilevati presso la boa Nausicaa di Cesenatico (FC), appartenente alla Regione Emilia-Romagna – Arpa SIMC. L'analisi è stata condotta su dati registrati ogni 30 minuti a partire dalla data di fine lavori (Maggio 2010) sino alla data di conclusione dei rilievi (Ottobre 2012). Poiché dal 12/10/2011 al 23/03/2012 la boa Nausicaa non ha registrato dati di moto ondoso, per tale periodo si è fatto riferimento alle registrazioni della boa RON di Ancona, fornite da ISPRA - Servizio Mareografico.

I dati ondametrici, corredati di altezza significativa (Hs), periodo di picco (Tp) e direzione di provenienza, sono stati trasposti al largo di Punta Marina, alla profondità di 10 m. Dall'elaborazione dei dati è stato possibile ricavare il clima ondoso relativo al periodo di osservazione. Sono inoltre stati individuati gli eventi di mareggiata verificatesi, perché è soprattutto verso questi che gli interventi di difesa costiera devono mostrare la loro efficacia.

Per quanto riguarda l'intero periodo di osservazione, da Maggio 2010 ad Ottobre 2012, i mari dominanti hanno avuto provenienza dal I quadrante (0-45°N), mentre i mari regnanti dal II quadrante (90-135°N). Le calme, cioè di stati marini con altezze d'onda inferiori a 0,25 m, sono state circa il 47% del totale (Fig. 8.102, Tab. 8.18).

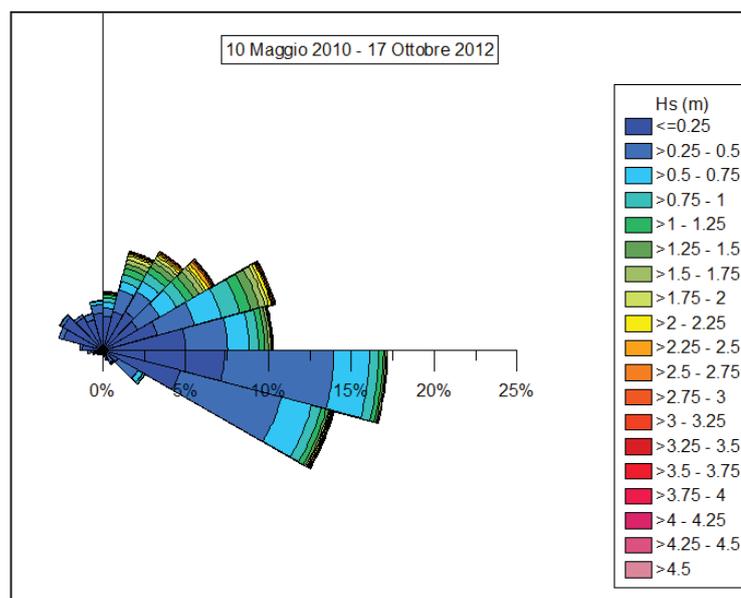


Fig. 8.102 - Rosa delle onde per l'intero periodo di studio.

## Risultati

Dir (°N) Hs (m)	0 - 45	45 - 90	90 - 135	135 - 180	180 - 225	225 - 270	270 - 315	315 - 360	Totale
0,25 - 0,5	3,16	6,12	14,72	1,00	0,22	0,43	0,67	1,13	<b>27,46</b>
0,5 - 0,75	1,52	4,03	4,58	0,15	0,04	0,01	0,02	0,23	<b>10,59</b>
0,75 - 1	1,24	2,39	1,34	0,05	0,01	0,00	0,00	0,04	<b>5,09</b>
1 - 1,25	0,96	1,47	0,68	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	<b>3,13</b>
1,25 - 1,5	0,68	1,20	0,30	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>2,20</b>
1,5 - 1,75	0,54	0,83	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>1,54</b>
1,75 - 2	0,44	0,36	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,90</b>
2 - 2,25	0,22	0,43	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,72</b>
2,25 - 2,5	0,17	0,28	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,51</b>
2,5 - 2,75	0,11	0,13	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,25</b>
2,75 - 3	0,08	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,17</b>
3 - 3,25	0,04	0,10	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,18</b>
3,25 - 3,5	0,03	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,10</b>
3,5 - 3,75	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,03</b>
3,75 - 4	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>
4 - 4,25	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>
4,25 - 4,5	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>
4,5 - 4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
4,75 - 5	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>
>5	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,04</b>
Totale	9,22	17,59	22,11	1,24	0,27	0,44	0,69	1,43	<b>52,99</b>
calme <0,25	6,72	10,47	13,85	0,88	0,63	1,52	6,35	6,59	<b>47,01</b>

Tab. 8.18 - Frequenze cumulate (%) delle altezze d'onda in funzione della direzione al largo di Punta Marina da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

Sono stati individuati 37 eventi di mareggiata, con valore soglia di 1,5 m. La direzione di provenienza principale è stata dal I quadrante (15-75°N), con massime altezze d'onda raggiunte di 6,2 m e altezza media di 2,6 m. Le mareggiate provenienti dal II quadrante sono state soltanto due, con altezza media di 2,7 m e massima di 3,5 m (Tab. 8.19, Fig. 8.103).

La durata delle mareggiate varia da un minimo di 6 ore ad un massimo di 102.5 ore (più di 4 giorni). L'evento più intenso è stato anche quello più lungo. Infatti dal 31 Gennaio 2012 al 05 Febbraio 2012 è stata registrata una mareggiata con altezza significativa massima di 6,2 m (Hs media 2,63 m) proveniente da NE (42°N). Chiaramente tale evento può essere considerato estremo, vista l'eccezionalità dell'altezza massima delle onde registrata e la durata totale (Fig. 8.104).

## Risultati

	DATA		Durata (h)	Dir. (N°)	Hs med (m)	Hs max (m)	Tp (s)	E (m <sup>2</sup> hr)	cat.
	inizio	fine							
1	15/05/10 11.30	15/05/10 19.00	8	31	1,75	1,99	5,82	23,9	1
2	21/06/10 07.30	21/06/10 16.30	9,5	43	1,77	2,24	6,2	29,2	1
3	28/08/10 20.00	29/08/10 07.30	12	53	1,87	2,26	6,6	41	1
4	25/10/10 23.30	27/10/10 10.30	35,5	55	1,75	2,41	6,75	111,8	2
5	01/11/10 00.00	02/11/10 03.00	27,5	84	1,53	1,66	8,27	62,4	2
6	20/01/11 08.00	23/01/11 07.30	72	57	1,96	2,69	6,91	285,9	3
7	28/01/11 04.00	28/01/11 16.30	13	63	1,57	1,75	6,51	32,4	1
8	25/02/11 21.30	26/02/11 10.00	13	60	1,77	2,18	6,89	41,4	1
9	01/03/11 05.00	03/03/11 00.00	42,5	62	2,56	3,8	7,78	292,8	3
10	06/03/11 22.30	07/03/11 16.00	18	69	1,98	2,35	6,88	71	2
11	20/03/11 21.00	21/03/11 18.30	22	59	1,54	1,75	6,44	52,3	1
12	12/04/11 23.30	13/04/11 08.00	9	49	2,09	2,56	6,88	40,5	1
13	08/05/11 20.00	09/05/11 07.00	11,5	62	1,77	2,57	6,59	37,4	1
14	15/05/11 14.30	16/05/11 03.30	13,5	28	1,82	2,6	6,37	42,1	1
15	13/10/11 19.30	15/10/11 14.00	41,5	42	1,91	2,77	6,63	157,3	3
16	20/10/11 13.00	21/10/11 10.30	22	38	1,56	1,92	6,07	53,4	1
17	25/10/11 22.30	26/10/11 22.00	24	103	1,64	1,87	7,23	64,9	2
18	04/11/11 23.30	07/11/11 20.00	69	113	2,23	3,5	7,98	365,8	3
19	18/12/11 22.30	20/12/11 05.30	30	30	1,81	2,27	5,97	100,2	2
20	22/12/11 10.00	22/12/11 19.00	9,5	24	1,56	1,94	5,37	19,8	1
21	25/12/11 00.00	26/12/11 01.00	25,5	40,2	1,96	2,4	6,44	100,6	2
22	03/01/12 04.00	03/01/12 12.00	7	59	1,74	2,18	6,68	22,6	1
23	24/01/12 22.00	26/01/12 11.00	37,5	31	1,78	2,37	6,14	119,9	2
24	29/01/12 05.30	29/01/12 17.00	12	61	1,64	1,84	6,31	32,2	1
25	31/01/12 23.00	05/02/12 11.30	102,5	42	2,63	6,18	7,32	841,6	5
26	06/02/12 20.00	09/02/12 03.30	56	27	2,45	3,71	7,34	352,8	3
27	10/02/12 01.30	12/02/12 15.00	59	40	2,94	5,24	7,55	570,9	4
28	20/02/12 11.00	21/02/12 11.30	25	41	2,19	2,75	6,85	122,8	2
29	27/02/12 05.00	27/02/12 12.30	8	40	1,62	1,99	6,15	21,14	1
30	06/03/12 05.00	07/03/12 01.30	19,5	79	1,97	2,5	6,6	77,7	2
31	09/03/12 05.30	09/03/12 21.30	16,5	54	2,05	2,71	6,83	71,3	2
32	01/04/12 10.00	01/04/12 16.30	7	64	1,94	2,55	6,97	26,2	1
33	13/05/12 04.00	13/05/12 19.00	15,5	59	2,32	3,08	7,6	86,9	2
34	14/05/12 08.30	14/05/12 14.00	6	29	1,7	2,02	6,42	17,6	1
35	16/05/12 10.00	16/05/12 17.30	8	23	1,77	2,06	6,62	25,4	1
36	22/07/12 15.30	23/07/12 17.00	26	58	2,17	2,84	7,04	126,8	2
37	13/09/12 08.00	14/09/12 20.30	37	53	1,84	2,49	6,9	127,6	2

Tab. 8.19 - Tabella riassuntiva delle mareggiate occorse nel periodo di studio.

In generale, si osserva una stagionalità degli eventi, in quanto sono state registrate mareggiate oltre i 2 m e con durata oltre le 40 ore nel periodo Ottobre - Marzo (categoria 3-4-5), sebbene nell'ultimo anno di osservazione si siano verificati eventi con altezze superiori a 2 m ma di breve durata anche in primavera ed estate (Fig. 8.105). Per quanto riguarda l'energia della mareggiata, le categorie più frequenti sono la "1-weak" (46 %) e "2-moderate" (35 %).

Altro dato interessante è la frequenza di accadimento delle mareggiate, significativamente alta, nel periodo Dicembre-Marzo 2012. Si sono verificati ben 13 eventi, per una durata complessiva di 408 ore in soli 82 giorni, pertanto circa il 21% del periodo è stato interessato da fenomeni di mareggiata con provenienza media da NE (45°N).

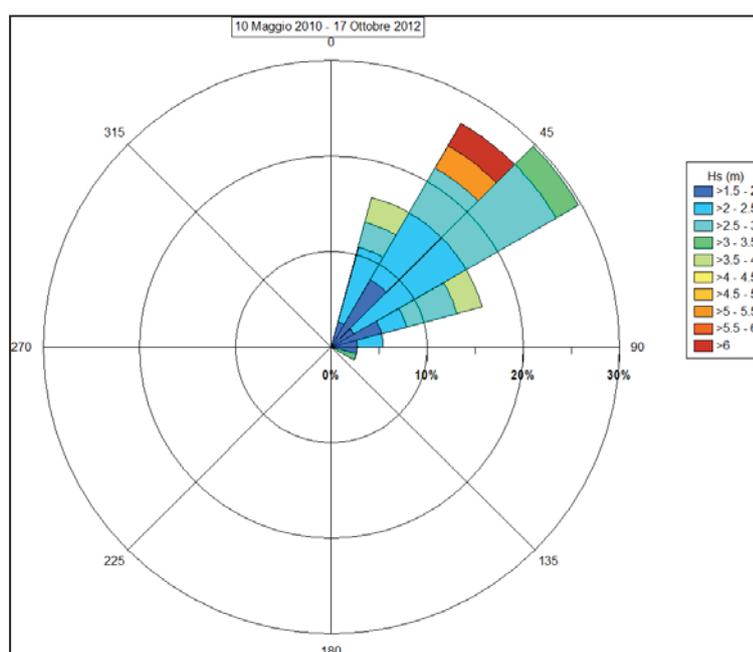


Fig. 8.103 - Grafico della provenienza delle mareggiate registrate da Maggio 2010 ad Ottobre 2012.

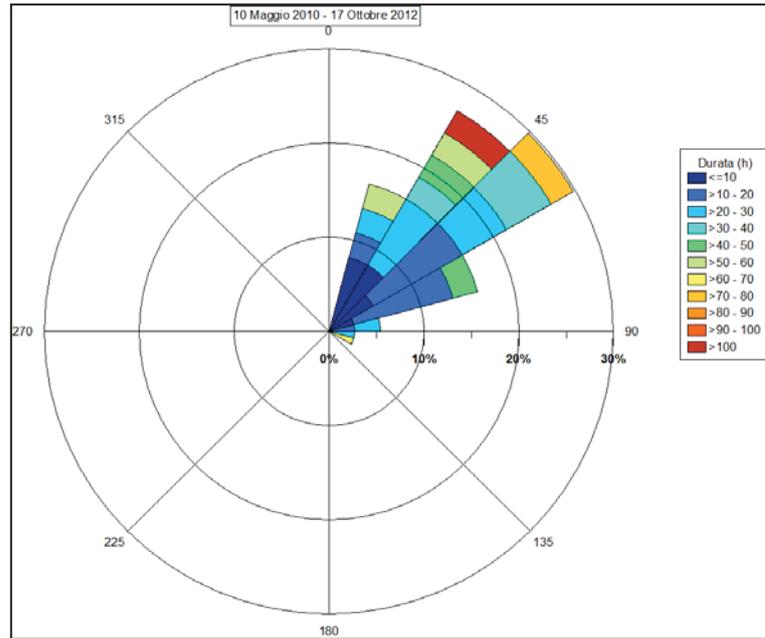


Fig. 8.104 - Grafico rappresentante la durata delle mareggiate registrate, per settori di provenienza.

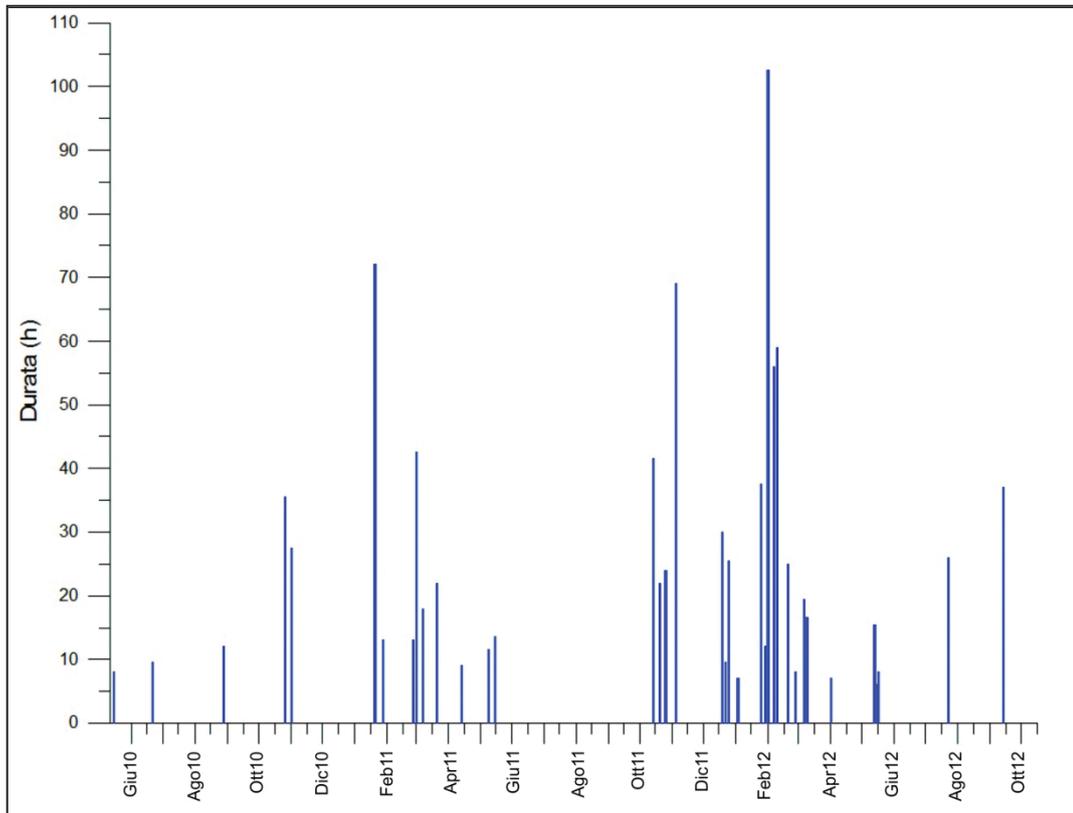


Fig. 8.105 - Grafico della durata delle mareggiate per il periodo Maggio 2010 - Ottobre 2012.

L'analisi del clima meteo marino in funzione dell'evoluzione topo-batimetrica evidenzia come l'occorrenza di mareggiate violente comporti una variazione morfologica dei fondali piuttosto immediata.

In particolare, tra Febbraio e Marzo 2011 si registrano 4 eventi di mareggiata, con una durata complessiva di 95,5 ore (19%), con una direzione media di 62°N ed un'altezza massima dell'onde di 3,8 m. Tra questi, l'evento più energetico è stato anche il più lungo (42,5 ore) di categoria energetica "3-significant". La risposta morfologica del litorale si concretizza in un generale arretramento della linea di riva ed erosione dei fondali prossimi a costa.

Il litorale non ha mostrato però un comportamento omogeneo da Nord a Sud. Infatti, nella zona a settentrione, libera da opere di difesa, la linea di riva è arretrata in media di 15 m e l'abbassamento di quota dei fondali sottocosta è stato di circa 0,5 m, ma non si sono rilevate variazioni significative oltre la profondità di -2 m (Fig. 8.106).

Nel tratto costiero centrale la risposta morfologica è stata dominata dallo smantellamento del ripascimento sommerso e dalla deposizione del sedimento asportato sui fondali prossimi a costa, tra le profondità di -1,5 e -2,5 m, mentre sembrano abbassarsi leggermente i fondali sottocosta (Fig. 8.107).

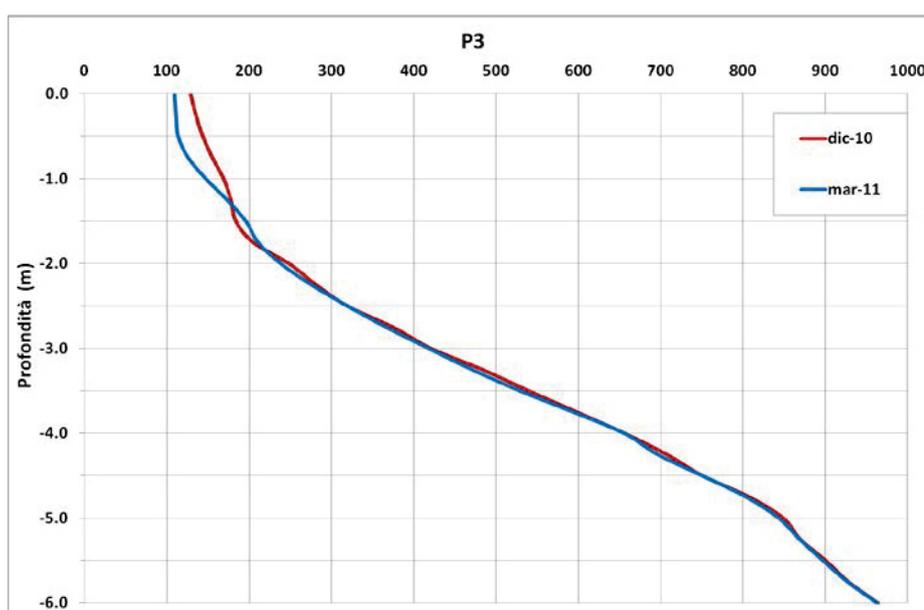


Fig. 8.106 - Variazione morfologica riscontrata lungo il profilo P03, nel tratto libero da opere di difesa, nel periodo Dicembre 2010 - Marzo 2011.

Per quanto riguarda la linea di riva, in corrispondenza del *reef* artificiale, è stato osservato un trend completamente opposto, con un arretramento medio di 8 m ed un abbassamento medio dei fondali prossimi a costa di 0,4 m. Anche i fondali alla base del *reef* sono stati erosi, ma tra le batimetriche di 1,5 e 2,5 m è stata osservata una deposizione (Fig. 8.108).

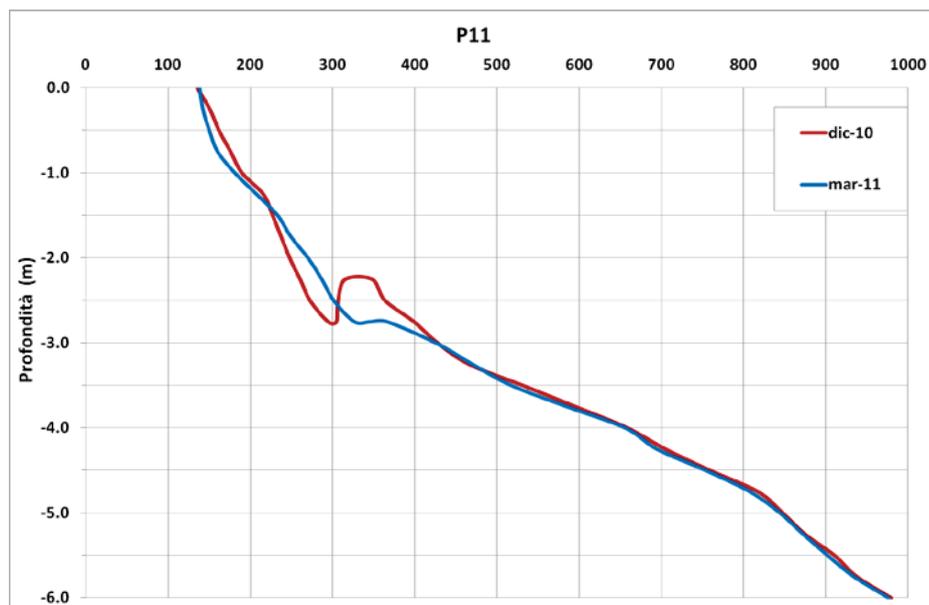


Fig. 8.107 - Variazione morfologica riscontrata lungo il profilo P11, in corrispondenza del tratto in cui è stato realizzato il ripascimento sommerso, nel periodo Dicembre 2010 - Marzo 2011.

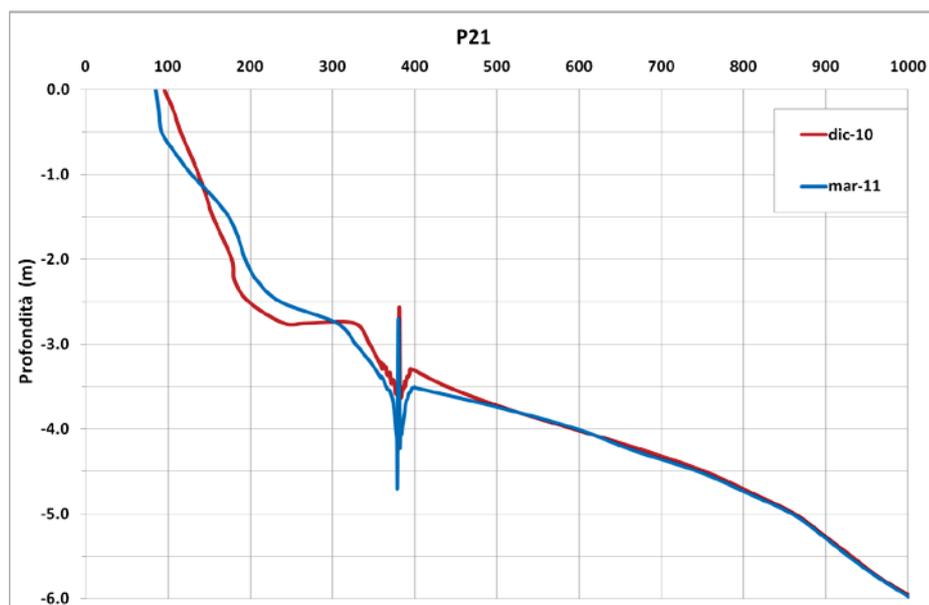


Fig. 8.108 - Variazione morfologica riscontrata lungo il profilo P21, in corrispondenza del tratto in cui è stato messo in opera il reef artificiale, nel periodo Dicembre 2010 - Marzo 2011.

Un altro periodo in cui si osservano interessanti correlazioni tra gli eventi di mareggiata e le variazioni morfologiche del litorale è quello tra Gennaio e Marzo 2012. Questo intervallo temporale è stato caratterizzato da numerosi eventi tra cui alcuni con caratteristiche eccezionali. Infatti si sono verificate ben 9 mareggiate, per complessivamente 336 ore (32%). La direzione media è stata da NE ( $46^\circ\text{N}$ ) e le altezze d'onda massime registrate sono state, relativamente ai due eventi più intensi, di 6,2 e 5,2 m. La risposta morfologica a tali eventi è stata ancor più significativa.

Osservando il tratto compreso tra il pennello "ruvido" e le opere rigide (Fig. 8.109), la linea di riva ha registrato un modesto avanzamento, mentre i fondali tra il ripascimento sommerso e la linea di riva hanno registrato un'erosione importante e la formazione di una barra sommersa, più vicina a costa rispetto alla zona di intervento (Fig. 8.110). Anche i fondali dietro al *reef* artificiale hanno visto la formazione di una barra, ma l'erosione sottocosta è stata molto più contenuta (Fig. 8.111).

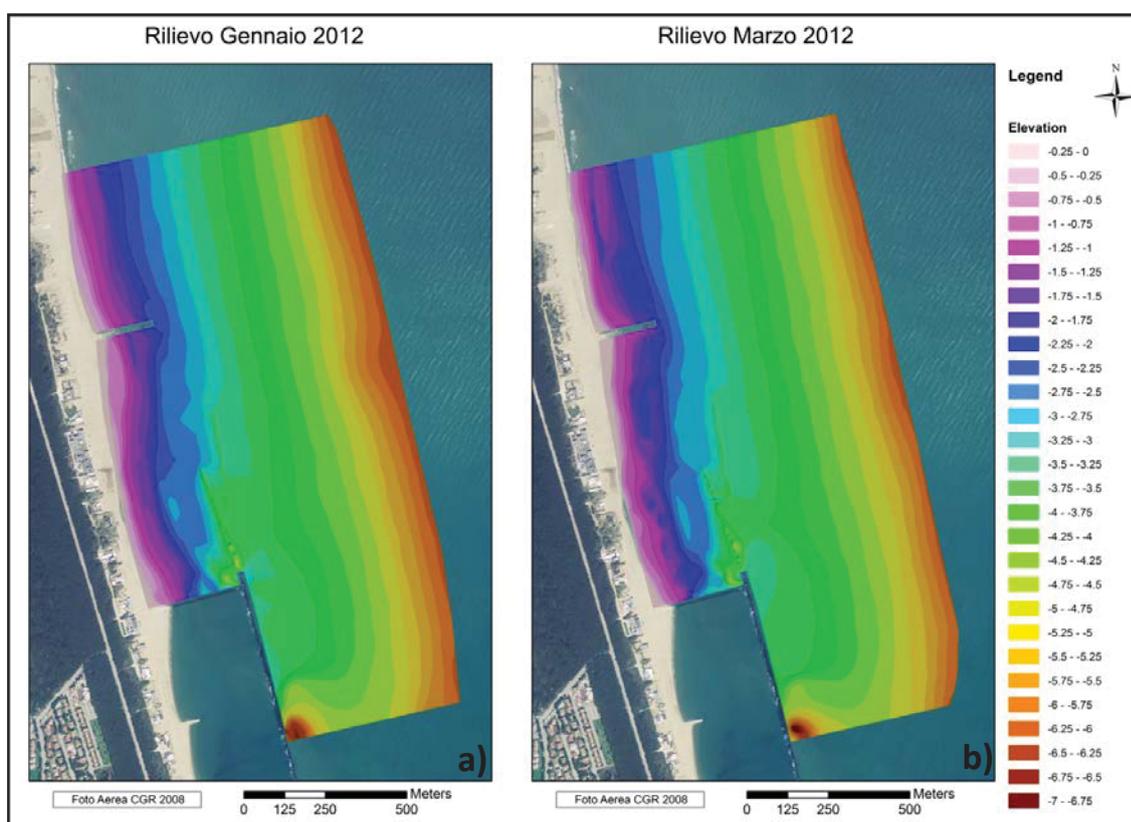


Fig. 8.109 - Mappe batimetriche dei rilievi di Gennaio (a) e Marzo (b) 2012.

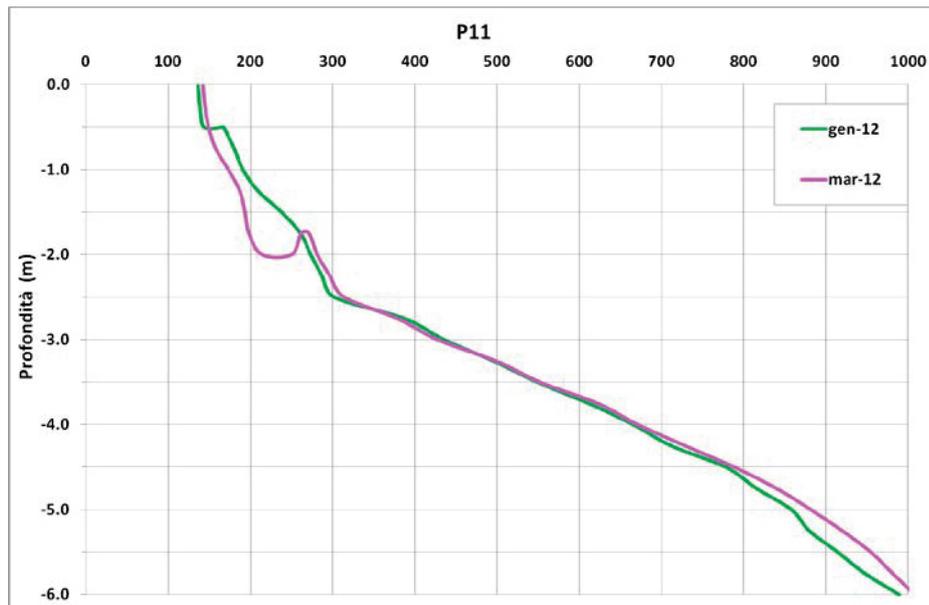


Fig. 8.110 - Variazione morfologica riscontrata lungo il profilo P11, in corrispondenza del tratto in cui è stato realizzato il ripascimento sommerso, nel periodo Gennaio - Marzo 2012.

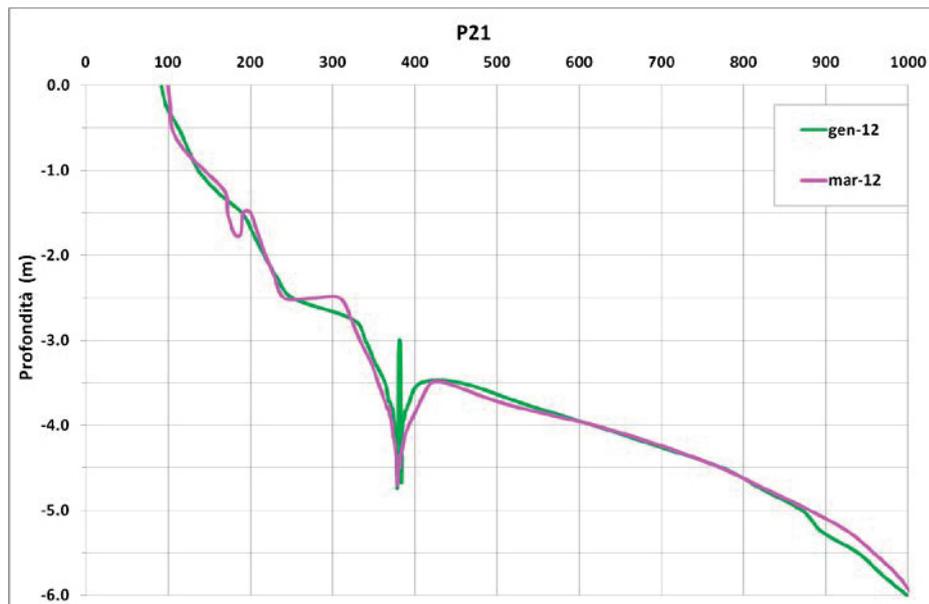


Fig. 8.111 - Variazione morfologica riscontrata lungo il profilo P21, in corrispondenza del tratto in cui è stato messo in opera il reef artificiale, nel periodo Gennaio - Marzo 2012.

Si sottolinea che nei casi evidenziati, durante le mareggiate, le onde non hanno avuto un'incidenza perpendicolare a costa ma con un'inclinazione rispetto alla linea di

riva rispettivamente di circa 54°. Tale obliquità chiaramente ha un effetto importante sul trasporto lungocosta, incentivando un trasporto sedimentario da Nord verso Sud. Chiaramente la morfodinamica della spiaggia sommersa sono legate a tale trasporto e le dinamiche evolutive non sono schematizzabili con semplici variazioni *cross-shore*, ma acquistano caratteristiche bidimensionali.

Le mareggiate verificatesi dopo il rilievo di Marzo 2012, e quindi dopo le intense mareggiate invernali appena descritte, sono state molto più brevi e con altezze significative più ridotte; inoltre, gli stati di mare da ESE (90-120°N) hanno avuto una frequenza maggiore. Tali condizioni, pertanto, possono aver rafforzato un trasporto sedimentario verso Nord.

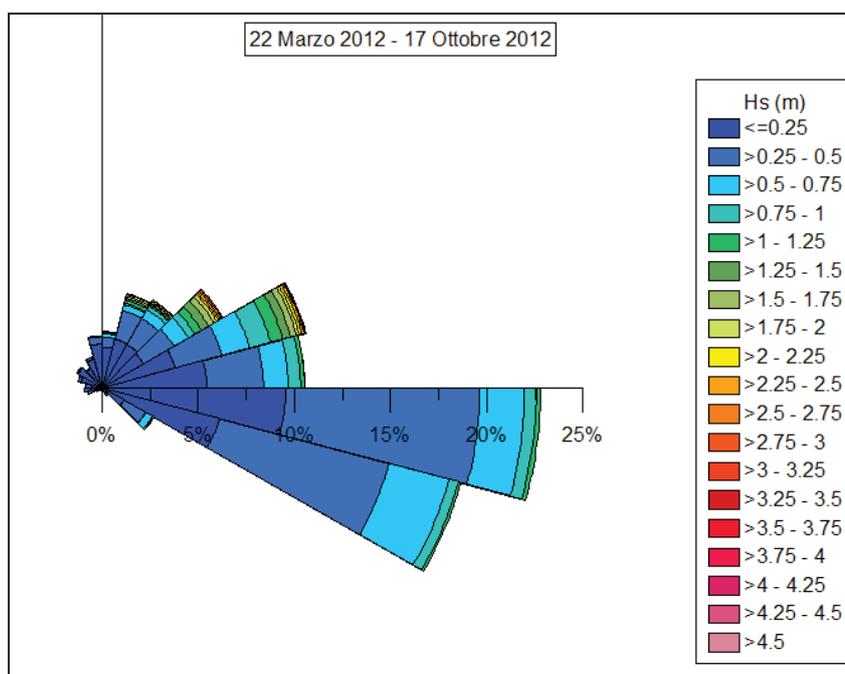


Fig. 8.112 - Rosa delle onde per il periodo Marzo - Ottobre 2012.

## 9 Discussione

---

Lo studio ha come oggetto la valutazione della *performance* e l'analisi della morfodinamica del tratto costiero oggetto dell'intervento realizzato presso Punta Marina nella primavera del 2010. Tale intervento, eseguito per mitigare il fenomeno erosivo che interessa da decenni il litorale, costituisce una soluzione sperimentale. Nel sito in oggetto è stato effettuato un ripascimento sommerso, con caratteristiche morfologiche simili ad una barra naturale (*feeder berm*), un ripascimento della spiaggia emersa ed è stata messa in opera una struttura semi permeabile intelaiata (*Tecnoreef*).

Dall'analisi bibliografica di esperienze simili è emerso che la posizione del ripascimento sommerso, così come la geometria ed il volume richiesto, sono parametri ancora piuttosto empirici. Questa tecnica utilizzata sempre più frequentemente a livello internazionale, come in Olanda, Germania, Danimarca, Stati Uniti, Australia, ecc. (Van Rijn and Walstra, 2004; Grunnet and Ruessink, 2005; Ojeda et al., 2008) è comunque di recente applicazione.

La creazione di una *feeder berm* ha lo scopo di fornire una protezione del litorale e di "alimentare" i bassi fondali e la spiaggia emersa. Semplificando e schematizzando gli effetti prodotti, sono stati osservati un effetto *longshore* ed un effetto *cross-shore*. Il primo è funzione della dissipazione operata dal ripascimento poiché favorisce il frangimento delle onde. Ne deriva che le correnti e quindi il trasporto lungocosta vengono ridotti, determinando una sedimentazione nella zona sopraflutto. Il secondo effetto, trasversale alla linea di costa, è legata alla componente del flusso diretto verso costa conseguente al frangimento dell'onda sulla cresta della barra artificiale e dunque alla perdita di parte della loro energia: ne risulta una componente diretta verso costa che contribuisce al trasporto di sedimento *onshore* (van Rijn and Walstra, 2004).

L'impiego del *reef* artificiale come opera difensiva è scarsamente documentato in letteratura. Queste strutture sommerse semi-permeabili dovrebbero ridurre l'energia del moto ondoso provocandone il frangimento, diminuendo così il loro potere erosivo nei confronti dell'arenile (Pilarczyk, 2005). La struttura del *reef* artificiale, di fatto permeabile, non dovrebbe alterare la morfologia del fondale, come spesso avviene con

le barriere tradizionali (spiagge pensili), per tale ragione viene definito anche come "soft engineering structure".

L'intervento di Punta Marina è stato analizzato e studiato al fine di comprendere la risposta morfodinamica del litorale a questa "perturbazione" nei due anni e mezzo di osservazione, svolta attraverso rilievi topo-batimetrici, raccolta ed analisi dei campioni di sedimento superficiale ed analisi delle forzanti marine.

E' doveroso sottolineare che la realizzazione di più interventi, molto diversi tra loro, rende complesso scindere gli effetti dovuti al ripascimento sommerso da quelli del reef artificiale. Il tutto è ulteriormente complicato dal contemporaneo ripascimento della spiaggia emersa e dalla presenza lateralmente di opere rigide tradizionali (pennelli, opere foranee).

Dall'analisi delle variazioni volumetriche riscontrate nell'area di studio tra l'inizio e fine dei lavori (da Febbraio a Maggio 2010) è stato stimato un versamento di circa  $127.862 \text{ m}^3$  su un'area di  $747.817 \text{ m}^2$  (celle 3-4-5-6) che determinato un innalzamento medio di  $0,17 \text{ m}^3/\text{m}^2$ .

Le celle relative ai fondali sottocosta ed interessate dall'intervento (cella 3 e 5) evidenziano un bilancio di  $+71.325 \text{ m}^3$  ( $+0,31 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ), mentre le celle al largo (4 e 6) registrano un guadagno di circa  $+56.537 \text{ m}^3$  ( $+0,11 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ).

Il bilancio sedimentario stimato per il periodo tra la fine dei lavori (Maggio 2010) ed Ottobre 2012 (29 mesi) nelle celle interessate dall'intervento (3,4,5,6) risulta positivo, con un deposito di circa  $+30.827 \text{ m}^3$  ( $+0,04 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ); anche per l'intera area di studio (7 celle; Fig. 9.1) si osserva un bilancio ancora positivo ( $+67.974 \text{ m}^3$ ;  $+0,04 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ).

In realtà vi sono aree che hanno registrato una perdita (seppur di poca entità) di sedimento: in particolare quelle dove sono stati realizzati i due interventi (cella 3 e 5, Fig. 9.1). In particolare, la cella che racchiude l'area del ripascimento sommerso (cella 3) mostra nei 29 mesi una variazione negativa ma effettivamente poco rilevante ( $-671 \text{ m}^3$ ), mentre nella cella 5 dove è stato posato il reef il bilancio risulta negativo ( $-3.887 \text{ m}^3$ ).

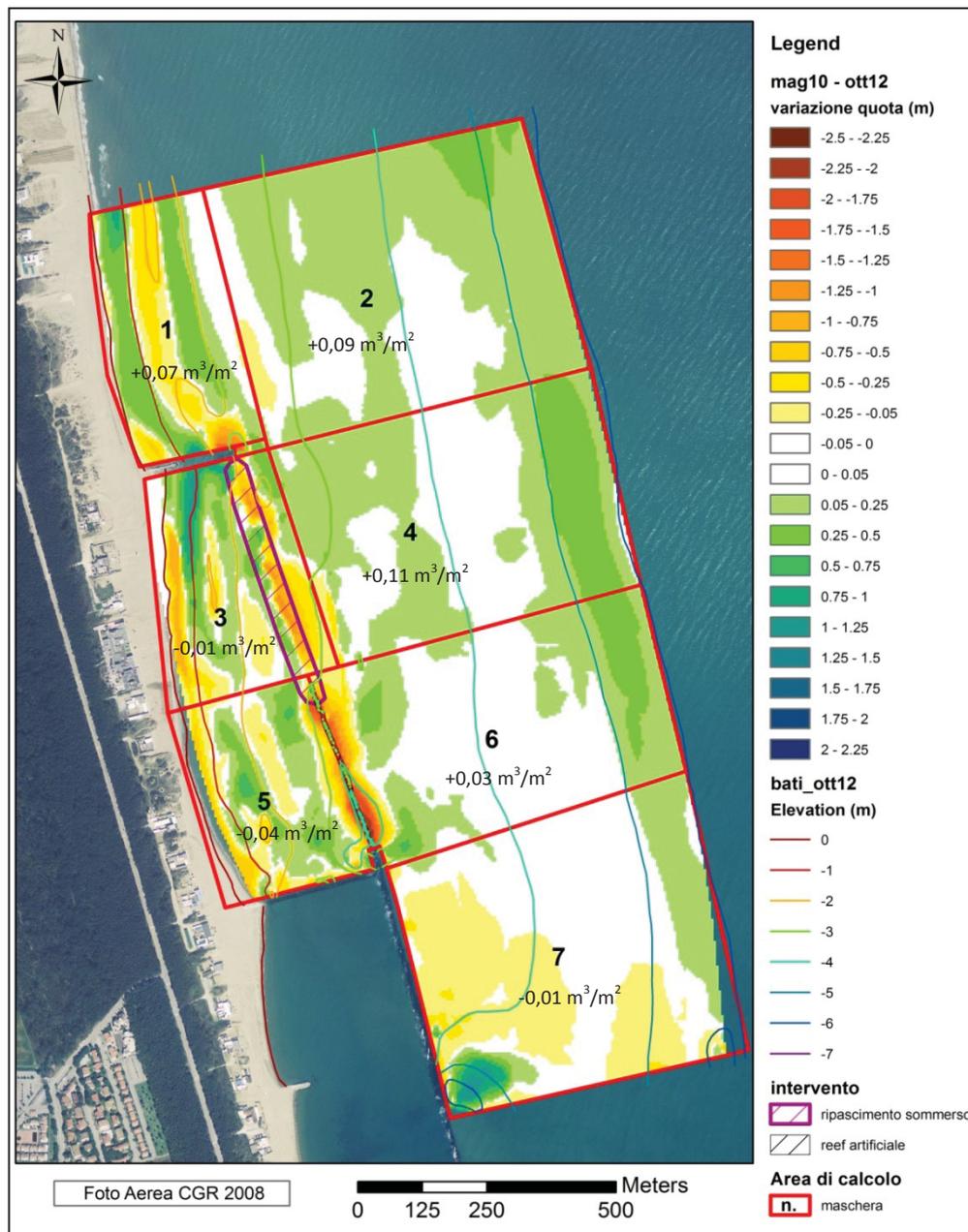


Fig. 9.1 - Variazioni di quota calcolate dalla fine dei lavori a Ottobre 2012 (29 mesi) con riportate le variazioni volumetriche compute espresse in m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

L'accumulo creato con il ripascimento sommerso è stato smantellato, mentre sui fondali prossimi a riva (tra -1 e -2 m) sono stati registrati altri accumuli di forma allungata parallelamente a riva con altezze medie di 50 cm. In prossimità della battigia, invece, si osserva una stretta fascia con abbassamenti in media tra i -25 ed i -50 cm.

I fondali su cui poggiano i moduli del *reef* mostrano importanti abbassamenti delle quote, che possono spiegare il bilancio negativo computato nella cella 5. Quest'area in abbassamento è piuttosto confinata e baricentrica alle strutture, con spessori via via crescenti procedendo verso meridione (si passa da -0,7 m ad oltre -2,4 m di variazione di quota) ed ampiezza *cross-shore* massima di 40-50 m (Fig. 9.2). Al largo dell'area di intervento, si registrano variazioni medie delle quote del fondale di  $\pm 5$ -10 cm ma oltre l'isobata dei 4,5 m tali variazioni diventano decisamente positive (+ 25 cm).

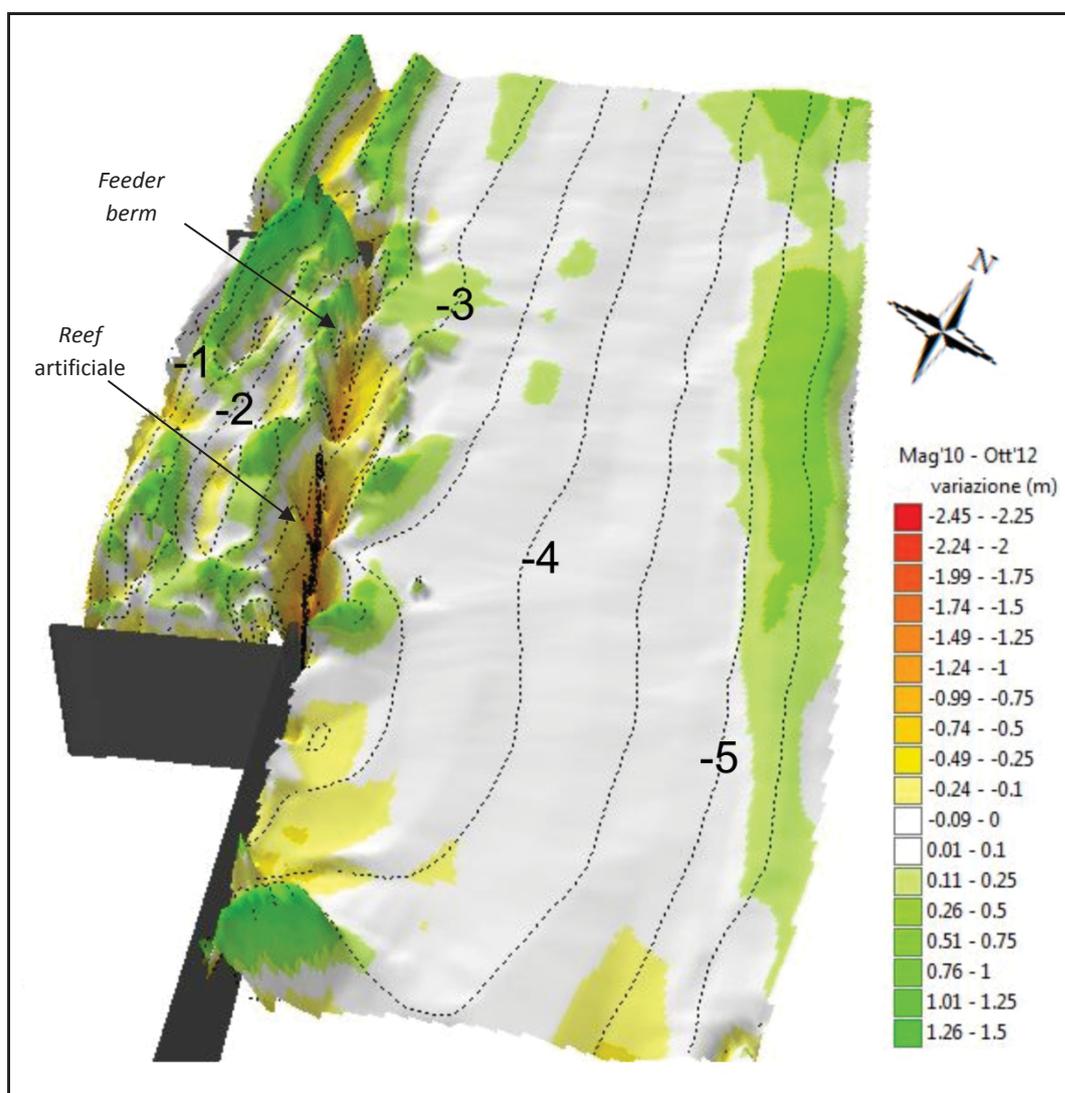


Fig. 9.2 - Proiezione obliqua delle variazioni di quota computate tra Maggio 2010 e Ottobre 2012 (esagerazione verticale 80x).

Contemporaneamente a tali variazioni, la linea di riva nel tratto tra i due pennelli mostra un trend regressivo (tasso medio -8,2 m/anno) (Fig. 9.3); tale valore però si deve ascrivere ai primi mesi dopo l'intervento, perché successivamente si è passati ad una sostanziale stabilità della linea di riva nell'ambito delle fluttuazioni stagionali.

E' interessante anche notare che dal confronto della linea di riva di Febbraio 2010 (situazione pre-intervento) con quella dell'ultimo rilievo (Ottobre 2012, dopo 32 mesi) vi sia stato un avanzamento medio di circa +2,6 m/anno. Questo risultato positivo assume un peso maggiore se si considera che il tasso di arretramento dell'arenile prima dell'intervento era di -6,6 m/anno (confronto Febbraio 2009 e Febbraio 2010) e che, nel periodo Maggio 2010 - Ottobre 2012, nel tratto subito a settentrione del pennello "ruvido", si è verificato uno spot erosivo con arretramento fino a -17 m/anno.

Nell'intero periodo di osservazione (dalla fine dei lavori ad Ottobre 2012, 29 mesi), i mari dominanti hanno avuto provenienza dal I quadrante (0-45°N), mentre i mari regnanti dal II quadrante (90-135°N). Le 37 mareggiate succedutesi, con direzione di provenienza principale dal I quadrante, possono spiegare la direzione verso meridione di migrazione dei sedimenti osservata dalle mappe della distribuzione del diametro medio (§ Cap.8.2).

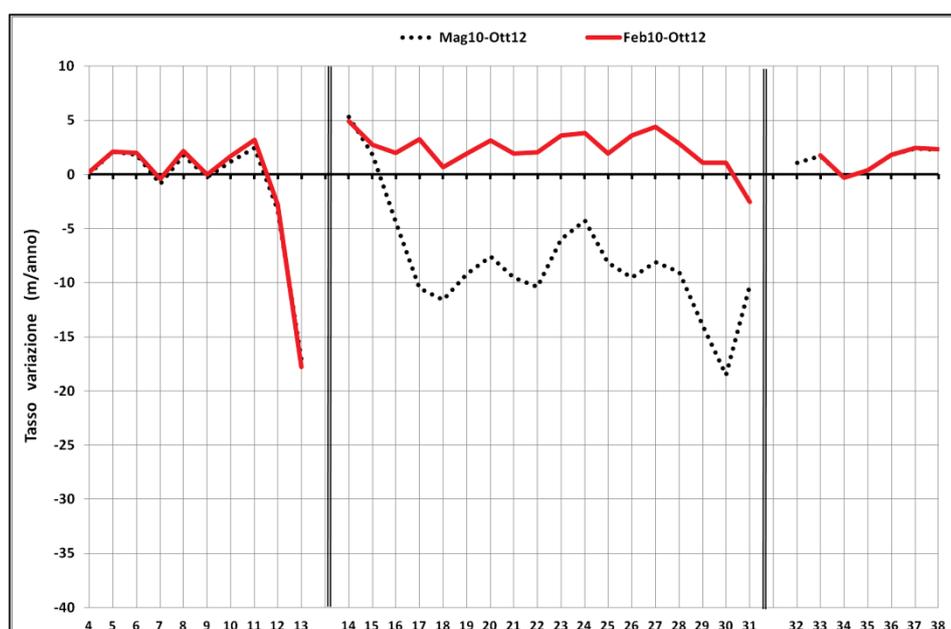


Fig. 9.3 - Tasso di variazione della linea di riva da Maggio 2010 ad Ottobre 2012 (linea a puntini nera) confrontata con variazione tra lo stato pre-intervento (Febbraio 2010) ed Ottobre 2012 (linea rossa).

Queste tendenze generali evidenziano comportamenti dissimili se suddividiamo il periodo di osservazione in due periodi (Maggio 2010- Maggio 2011, Maggio 2011- Ottobre 2012).

**Maggio 2010- Maggio 2011**

Nel primo periodo, nelle celle 3-4-5-6 (Fig. 9.4) vi è stato un bilancio volumetrico negativo ( $-68.872 \text{ m}^3$ ;  $-0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ). In particolare le celle 3 e 5 hanno perso complessivamente  $-20.371 \text{ m}^3$  ( $-0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ); considerando però che il versamento è stato di circa  $127.862 \text{ m}^3$ , è deducibile che circa il 46% sia rimasto nelle quattro celle.

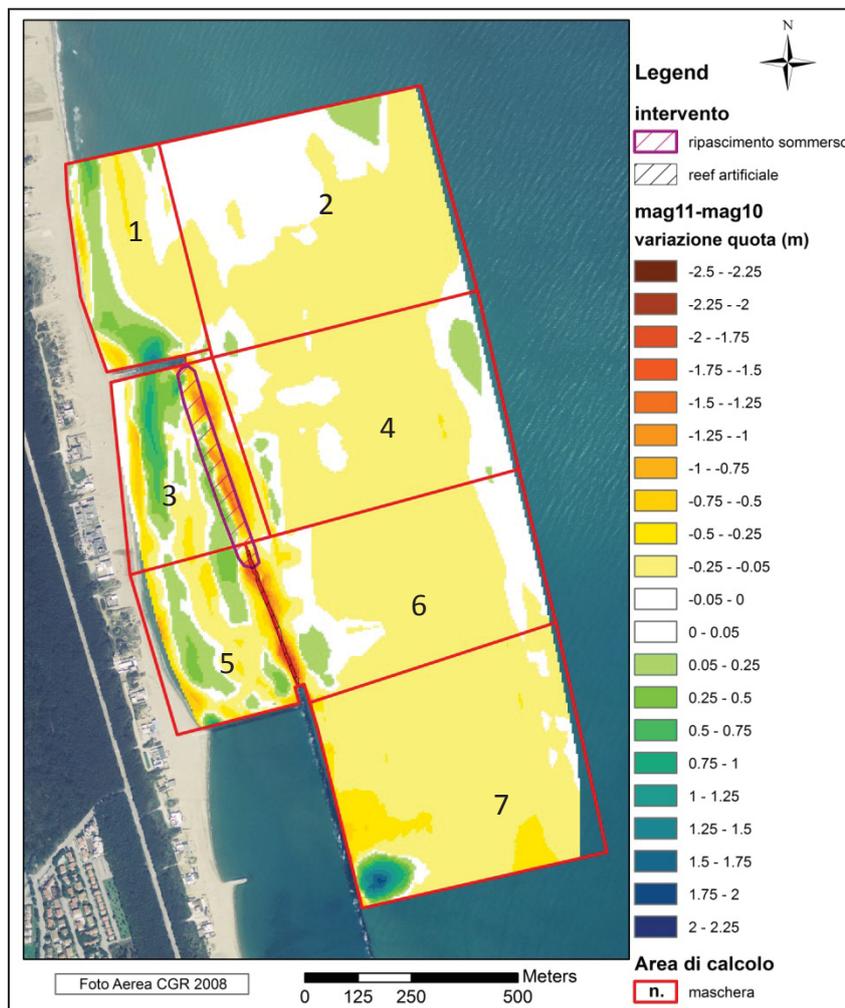


Fig. 9.4 -Variazioni di quota nel primo anno di osservazione (Maggio 2010 - Maggio 2011).

Considerando l'area vasta indagata (sette celle, Fig. 9.4) in questo primo periodo è stata registrata una perdita complessiva di circa  $-127.705 \text{ m}^3$  di sedimento ( $-0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ). Quest'ultimo dato evidenzia lo stato di precarietà in cui versa questo litorale in particolare nei fondali più profondi (celle 2,4,6,7; bilancio  $-107.410 \text{ m}^3$ ;  $-0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ).

In questo anno il clima marino ha visto il 52% degli eventi provenienti da NE (Hs max 3,8; Hs med 0,8) ed il 48% proveniente da SE (Hs max 2,0; Hs med 0,5). In totale le calme (Hs<0,25 m) sono state il 47% (Fig. 9.5). Le 14 mareggiate registrate hanno avuto provenienza sempre da NE, ad eccezione di una proveniente da E. Tali mareggiate sono state poco energetiche, ad eccezione di 2 di categoria 3 (in Gennaio e Marzo 2011).

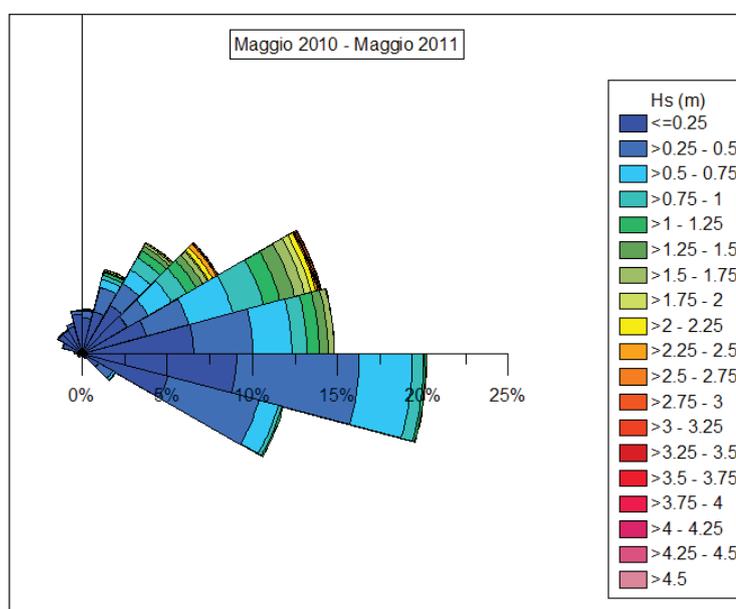


Fig. 9.5 - Rosa delle onde trasposte al largo di Punta Marina, periodo Maggio 2010- Maggio 2011.

Le analisi batimetriche hanno evidenziato come la *feeder berm* già dopo 7 mesi (Dicembre 2010) risultasse in parte smantellata e dopo 1 anno (Maggio 2011) fosse quasi completamente scomparsa (Fig. 9.6).

Pur con le dovute cautele legate alla stagionalità ed al breve periodo di osservazione, si osserva che nei primi 7 mesi vi è stato un evidente arretramento della linea di riva ( $-2,7 \text{ m/mese}$ ) (§ Cap. 8.1, Fig. 8.3). Nei successivi 5 mesi (1 anno dall'intervento) si è verificata una inversione di tendenza ( $+1,4 \text{ m/mese}$ ) che evidenzia

una sostanziale stabilità della linea di riva nel tratto antistante il ripascimento sommerso, un leggero recupero nella parte centrale (estensione 300 m con +2 m/mese) ed un arretramento nel tratto antistante il *reef* (§ Cap. 8.1, Fig. 8.3). Pertanto il tasso negativo medio osservato durante il primo anno (-15,7 m/anno) è ascrivibile oltre alla perdita iniziale anche a dei focus erosivi in corrispondenza del *reef*.

La rapida evoluzione del ripascimento sommerso, osservata durante il primo anno, potrebbe essere legata al tipo ed alla quantità di sedimento versato ed alla profondità di realizzazione dell'intervento. Infatti, nei casi riportati in letteratura (Johnson et al., 2001; Grunnet et al., 2004; van Duin et al., 2004; Grunnet and Ruessink, 2005) il volume di materiale versato è stato sempre sensibilmente maggiore ( $1-2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ;  $200 \div 450 \text{ m}^3/\text{m}$ ) rispetto al caso di Punta Marina ( $41.800 \text{ m}^3$ ;  $84 \text{ m}^3/\text{m}$ ). Chiaramente anche le profondità sono state molto diverse: generalmente i ripascimenti sommersi in Europa vengono eseguiti tra le batimetriche 4-8 m, cioè a profondità molto maggiori rispetto al caso di Punta Marina (-2,7 m).

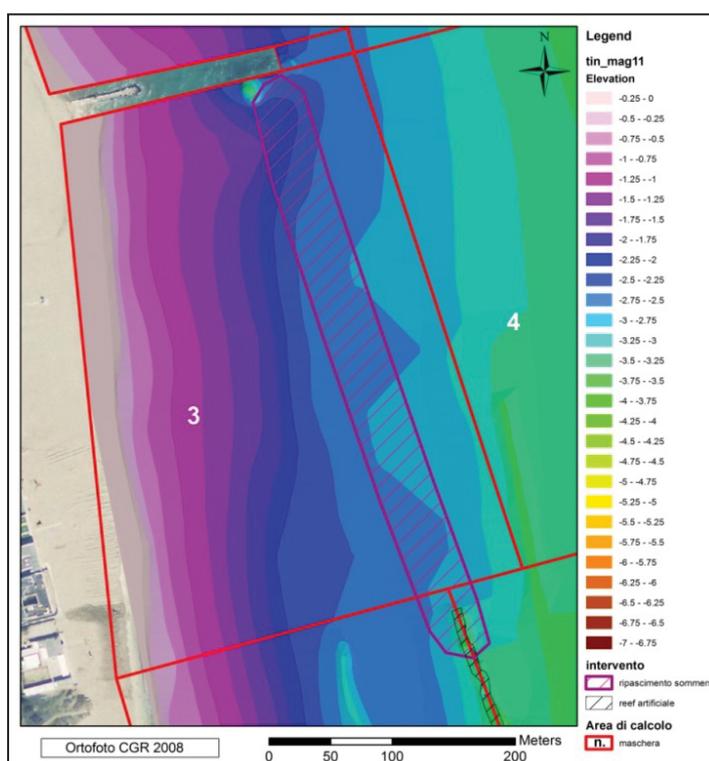


Fig. 9.6 - Mappa batimetrica del rilievo eseguito in Maggio 2011.

Altro dato rilevante è il tipo di materiale di prestito impiegato nei ripascimenti sommersi: nei casi in letteratura risulta l'utilizzo, in generale, di un sedimento più grossolano rispetto a quello nativo sia della zona di versamento sia della spiaggia intertidale (Grunnet et al., 2004; Van Duin et al., 2004).

Nel caso di Punta Marina, il diametro medio del sedimento versato ( $2,2 \phi$ ), era più grossolano rispetto a quello nativo nell'area di versamento ( $3,2 \phi$ ) ma più sottile di quello della spiaggia emersa ( $1,9 \phi$ ).

Inoltre, a Terschelling (NL) il sedimento eroso dal ripascimento migrò *onshore* ed alimentò i fondali interni, determinando un avanzamento della linea di riva circa +15 m/anno nei 6 anni successivi (l'arretramento pre-ripascimento era circa -3m/anno; Grunnet and Ruessink, 2005). Anche a Punta Marina si è registrata una migrazione *onshore* del sedimento versato (Fig. 9.7), ma non un avanzamento della linea di riva.

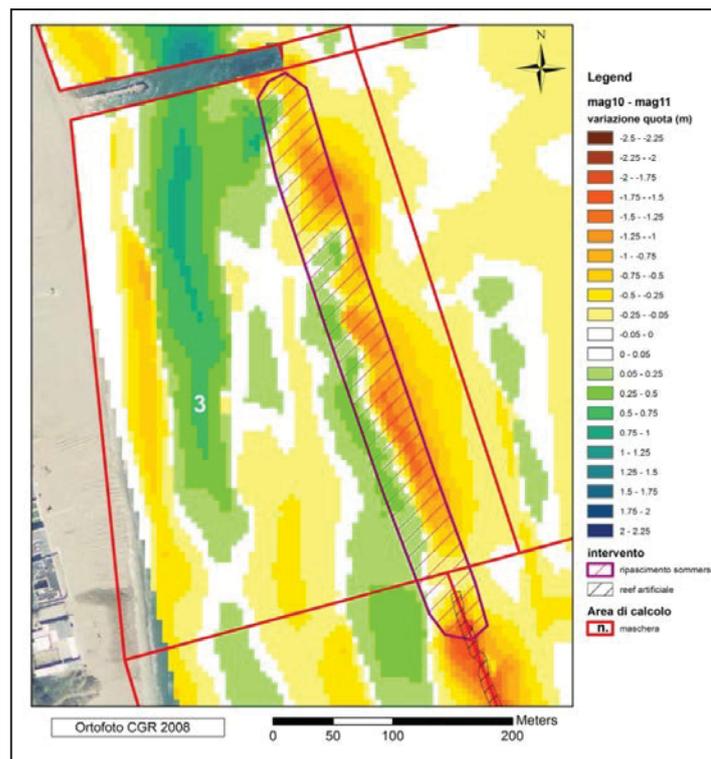


Fig. 9.7 - Mappa delle variazioni di quota rilevate da Maggio 2010 a Maggio 2011 nel tratto onshore del ripascimento sommerso (cella 3).

Le mappe sedimentologiche, in particolare quella del diametro medio, confermano il movimento *onshore*, evidenziando una fascia con un sedimento più grossolano e peggio cernito ( $Mz: 2,2\phi$ ;  $\sigma: 0,8\phi$ ) rispetto a quello nativo ( $Mz: 3\phi$ ;  $\sigma: 0,5\phi$ ) (§ Cap. 8.2, Fig. 8.82) che si sviluppa nell'area di versamento.

Gli accumuli sui fondali meno profondi hanno garantito una maggior frangenza delle onde la quale ha contribuito alla stabilità della linea di riva; il volume accumulato però non è paragonabile a quello eroso, come avvenuto nei casi olandesi (Hoekstra et al., 1996; Spanhoff et al., 1997; Grunnet, 2002). In tali casi infatti il bilancio sedimentario era stato fortemente positivo.

La migrazione dei sedimenti, oltre che *onshore*, è stata osservata anche *longshore*, verso meridione nel tratto protetto dal *reef*, determinando anche qui la formazione di accumuli sabbiosi (Fig. 9.8). Questi ultimi si possono correlare dalla direzione obliqua delle ondate più energetiche di questo primo periodo, tutte provenienti da NE.

Sono inoltre stati evidenziati gli stessi problemi di escavazione in corrispondenza della barriera in *reef* già riscontrati nelle esperienze estere (Ranasinghe et al., 2001; Smith et al., 1998; Simioni and Esteves, 2010).

Questa escavazione presenta un tendenziale approfondimento ed un ampliamento dell'area interessata procedendo verso meridione. Ciò è probabilmente dovuto ad un maggior rifornimento di sedimento nella parte settentrionale proveniente dall'erosione del ripascimento sommerso, che è mancato più a Sud. Oltre a questo, nella porzione meridionale le distorsioni del modo ondoso legate all'effetto della testata delle opere foranee e del pennello possono aver certamente accentuato il fenomeno erosivo.

La mancanza di depositi sedimentari all'interno dei moduli fa supporre che il frangimento delle onde determini un basculamento della struttura ed una turbolenza all'interno della struttura in grado di mettere in sospensione il sedimento; la formazione di correnti di ritorno prendono in carico tale sedimento e, non essendo bloccate dalla struttura in quanto permeabile, lo disperdono al largo.

Questo trova riscontro anche nella distribuzione areale del diametro medio sia a 7 mesi dall'intervento che ad Ottobre 2012 (§Cap. 8.2, Fig. 8.82 e Fig. 8.93).

Tali mappe evidenziano infatti una fascia di sedimento più grossolano che si sviluppa perpendicolare alla costa lungo il pennello Sud ed oltrepassa il *reef*. Tali sedimenti andrebbero ad alimentare dei depositi presenti più al largo, oltre la struttura, ad una distanza da questa di circa 50-70 m (Fig. 9.8).

Durante il primo anno di osservazione sono state condotte delle simulazioni numeriche sul litorale in esame; sono stati applicati i modelli bidimensionali SW-FM (*Spectral Waves - Flexible Mesh*) e FM-FM (*Flow Model - Flexible Mesh*) e ST-FM (*Sediment Transport - Flexible Mesh*) del codice di calcolo MIKE21, sviluppato dal *Danish Hydraulic Institute* (Simeoni et al., 2011; Utizi et al., 2012).

I risultati ottenuti dalla simulazione di alcune mareggiate da NE evidenziano la frangenza delle onde in corrispondenza della *feeder berm* e del *Tecnoreef* diminuendo progressivamente l'altezza nell'area protetta. La corrente generata presenta velocità superiori in corrispondenza della cresta delle due strutture e rallenta nelle aree protette. Si formano inoltre dei vortici in corrispondenza del *Tecnoreef* e della barriera in massi (Fig. 9.9).

Il modello applicato ben rappresenta sia le aree di erosione, sia la migrazione di sedimenti *onshore* e *longshore* verso Sud, mentre riesce a riprodurre gli effetti generati dalla presenza del *Tecnoreef*. Infatti la struttura ha una larghezza molto ridotta, non sufficiente a far frangere l'onda; inoltre è piuttosto complesso riprodurre nel modello numerico la configurazione della struttura (intelaiata e semipermeabile).

Nonostante ciò, l'accelerazione della corrente in corrispondenza del *Tecnoreef* potrebbe aver determinato fenomeni di scalzamento che ne hanno favorito l'affossamento come ipotizzato; inoltre l'idrodinamica delle masse d'acqua che attraversano la struttura conferma la fuoriuscita verso il largo del materiale.

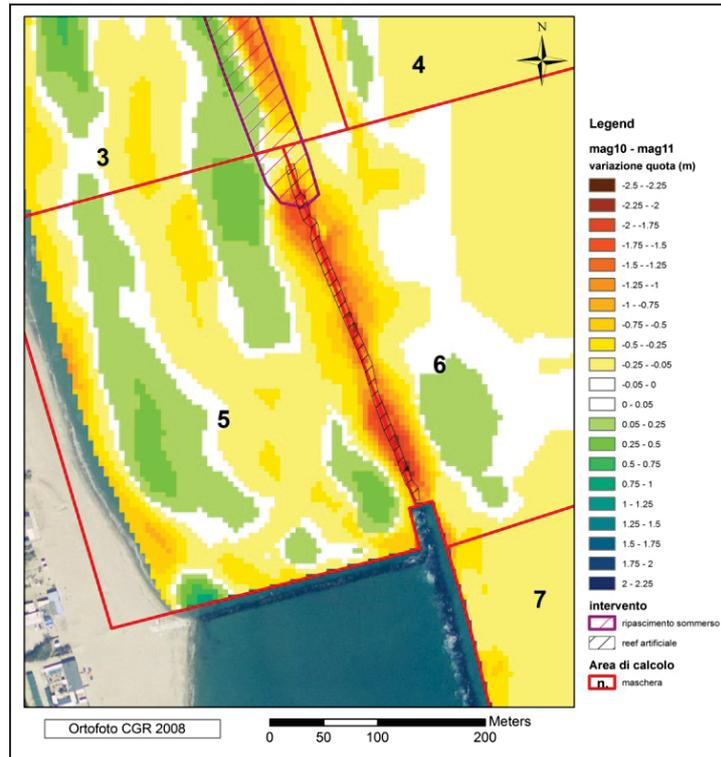


Fig. 9.8 - Mappa delle variazioni di quota rilevate da Maggio 2010 a Maggio 2011 nel tratto onshore del reef artificiale (cella 5).

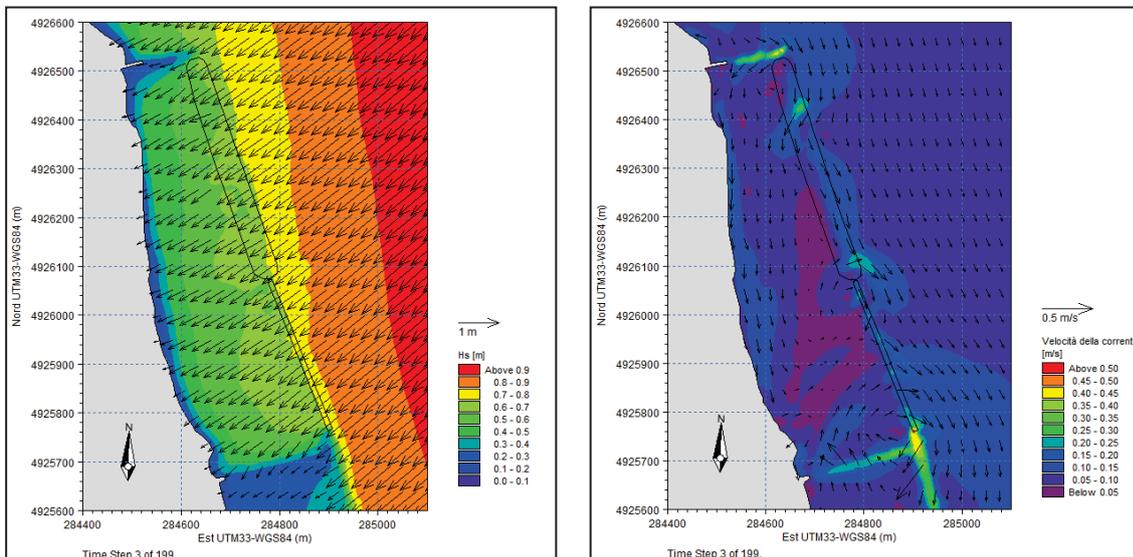


Fig. 9.9 - Simulazione di una mareggiata avente direzione media di 30°N, Hs max=1,99m. A sinistra: campo di moto ondoso al picco della mareggiata. A destra: campo di correnti generato .

**Maggio 2011- Ottobre 2012**

I rilievi eseguiti nei successivi 17 mesi (Maggio 2011-Ottobre 2012) evidenziano la permanenza del trend deposizionale iniziato nella primavera 2011. Infatti, osservando le variazioni di quota computate per questo periodo, il bilancio delle celle interessate dall'intervento è di circa  $+100.242 \text{ m}^3$  ( $+0,13 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ) (Fig. 9.10).

Le celle sottocosta (3 e 5) complessivamente hanno visto la deposizione di circa  $+15.703 \text{ m}^3$  a conferma di un maggior guadagno delle celle esterne (celle 2,4,6,7;  $+174.341 \text{ m}^3$ ).

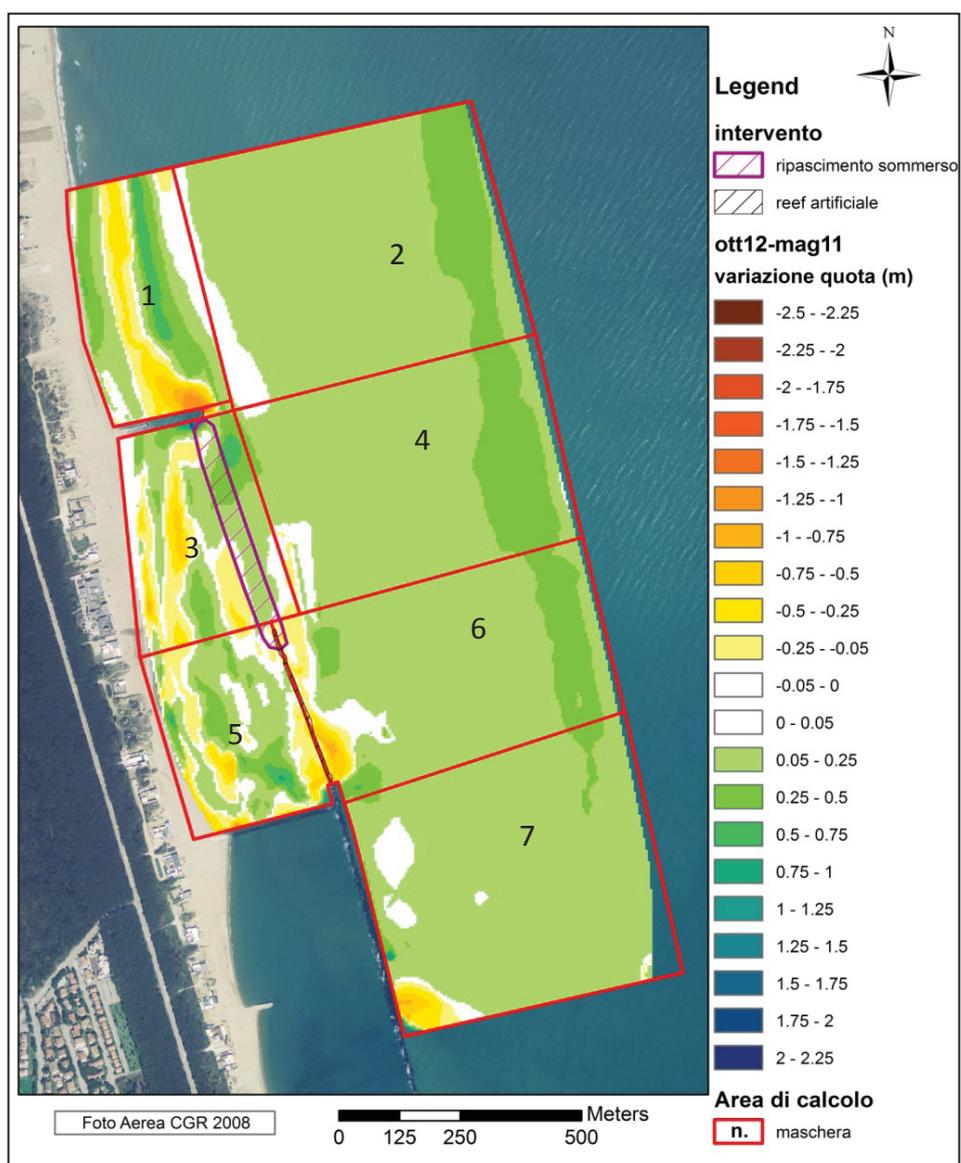


Fig. 9.10 - Variazione di quota per il secondo periodo analizzato.

Il mare regnante in questo periodo ha avuto provenienza da SE (60%), con Hs media di circa 0,54 m, mentre il mare dominante da NE (40%) con altezze medie di 0,92 m. Le calme sono state il 57% delle registrazioni totali.

In questo lasso di tempo si sono verificati 23 eventi di mareggiata; la loro direzione di provenienza principale è stata dal I quadrante (15-75°N), con altezze d'onda massime di 6,2 m e media di 2,6 m.

Le mareggiate provenienti dal II quadrante sono state soltanto due (110°N), con altezza media di 2,7 m e massima di 3,5 m (Ottobre e Novembre 2011). E' importante ribadire che sono state registrate, tra Gennaio e Febbraio 2012, due mareggiate eccezionali, per altezza e durata), verificatesi a distanza di soli 12 giorni ed intervallate da un'altra mareggiata di media intensità (§ Cap. 8.3).

In particolare dal 31 Gennaio 2012 al 05 Febbraio 2012 (durata 102 ore) è stata registrata una mareggiata con altezza significativa massima di 6,2 m (Hs media 2,63 m) proveniente da NE (42°N), classificabile come estrema (categoria 5). Dopo un giorno si è verificata una mareggiata di categoria 3, durata 56 ore (Hs med 2,5 m, Hs max 3,7 m) e dopo un giorno ancora una mareggiata di categoria 4 (Hs med 2,9 m, Hs max 5,2 m).

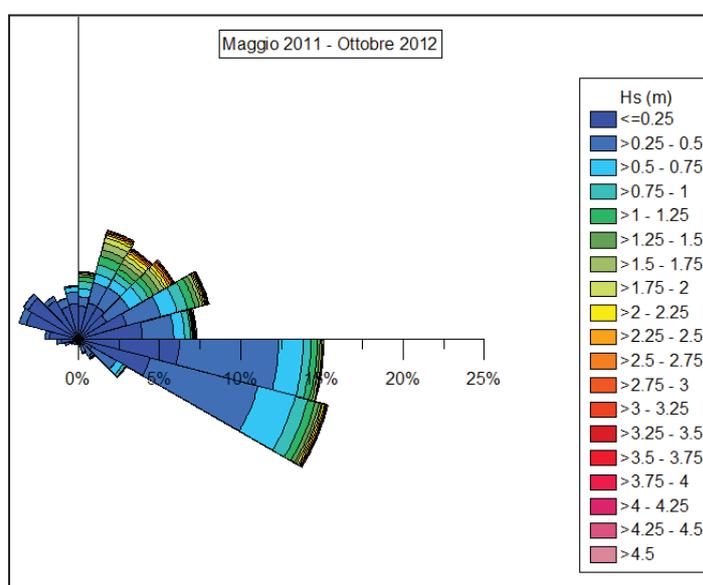


Fig. 9.11 - Rosa delle onde per il secondo periodo analizzato (Maggio 2011 - Ottobre 2012).

La direzione del moto ondoso delle mareggiate ha avuto una provenienza media da 46°N. Tale obliquità rispetto alla costa chiaramente ha determinato un effetto importante sul trasporto *lonshore* (durante tali eventi) che è stato quasi sempre diretto verso meridione. Il mare regnante però è stato da SE (59%, Hs med 0,4 m).

Focalizzando l'attenzione sull'evoluzione delle due celle interessate dall'intervento (cella 3 e 5), si osservano rilevanti variazioni.

Per quanto riguarda la cella 3 (Fig. 9.12) il trend è estremamente positivo sia per quanto riguarda i fondali (+8.000 m<sup>3</sup>; +0,06 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) che per la linea di riva, che mostra una sostanziale stabilità, con fluttuazioni entro i ±5 m.

Nel periodo invernale (Gennaio - Marzo 2012) in questa cella, proprio in concomitanza con le mareggiate citate, vi è stata una perdita di materiale di circa - 5.000 m<sup>3</sup> mentre la linea di riva è leggermente avanzata, forse perché alimentata dallo smantellamento degli argini invernali.

Anche nella cella 5 (Fig. 9.13) si evidenzia un bilancio positivo (+7.618 m<sup>3</sup>; +0,07 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>), mentre la linea di riva registra un tasso di arretramento di circa -5 m/anno con punte anche di -10 m.

Inoltre si continuano ad osservare abbassamenti del fondale su cui poggia il *reef* artificiale (quote più basse fino a -4,5 m). Sebbene la velocità di abbassamento sembra diminuita rispetto al primo anno, le variazioni riscontrate in questo periodo nell'area erosa sono all'incirca comprese tra -0,3 e -0,8 m. I valori più elevati si osservano in corrispondenza della zona più meridionale, a partire alla barriera foranea per una lunghezza parallela a costa di 140 m verso Nord ed allargandosi di circa 120 m (Fig. 9.13). Il rilievo multi-beam ha rivelato inoltre il disassamento della struttura e sorprendenti collassi di alcune parti dei moduli (Appendice A).

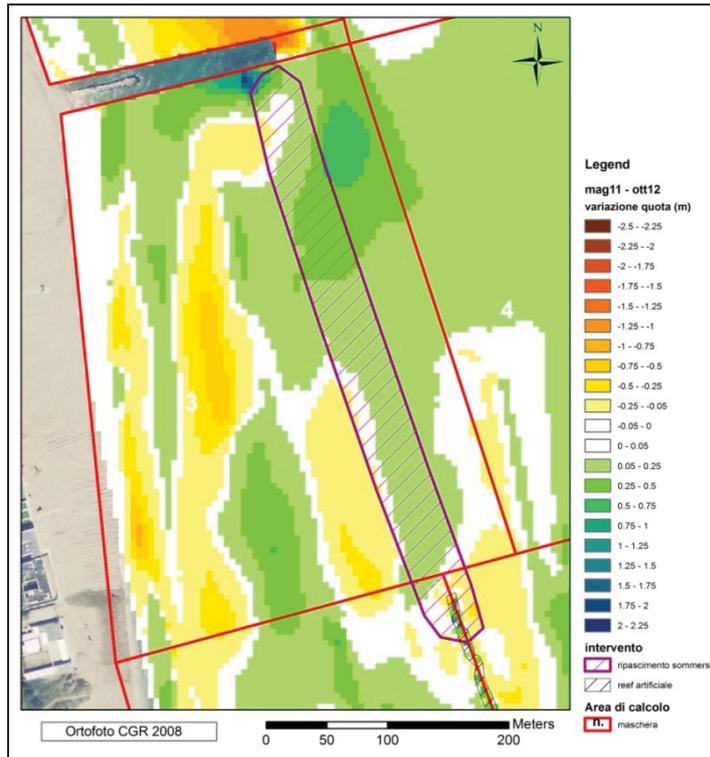


Fig. 9.12 - Mappa delle variazioni di quota rilevate da Maggio 2011 a Ottobre 2012 nel tratto onshore del ripascimento sommerso (cella 3).

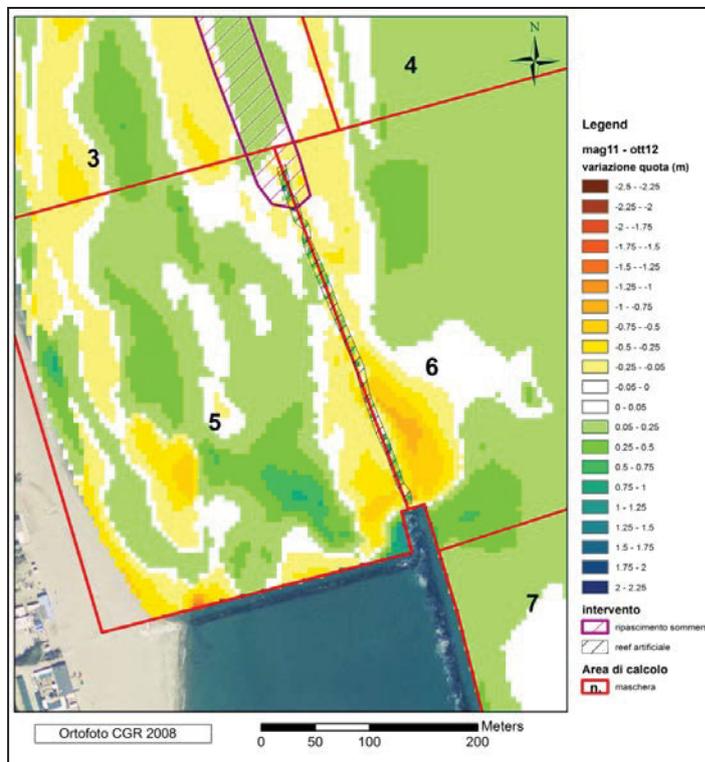


Fig. 9.13 - Variazione di quota nella cella 5 da Maggio 2011 ad Ottobre 2012.

L'ispezione subacquea, svolta nell'ambito della verifica strutturale del *Tecnoreef* e commissionata dal Comune di Ravenna, ha confermato tali cedimenti e la rottura della rete elettrosaldata posta al di sotto dei moduli. Tali effetti sono estremamente esplicativi della poca resistenza strutturale del reef artificiale agli attacchi ondosi.



Fig. 9.14 - Foto subacquea di un modulo del reef collassato. In evidenza la rottura della rete elettrosaldata. Giugno 2012.

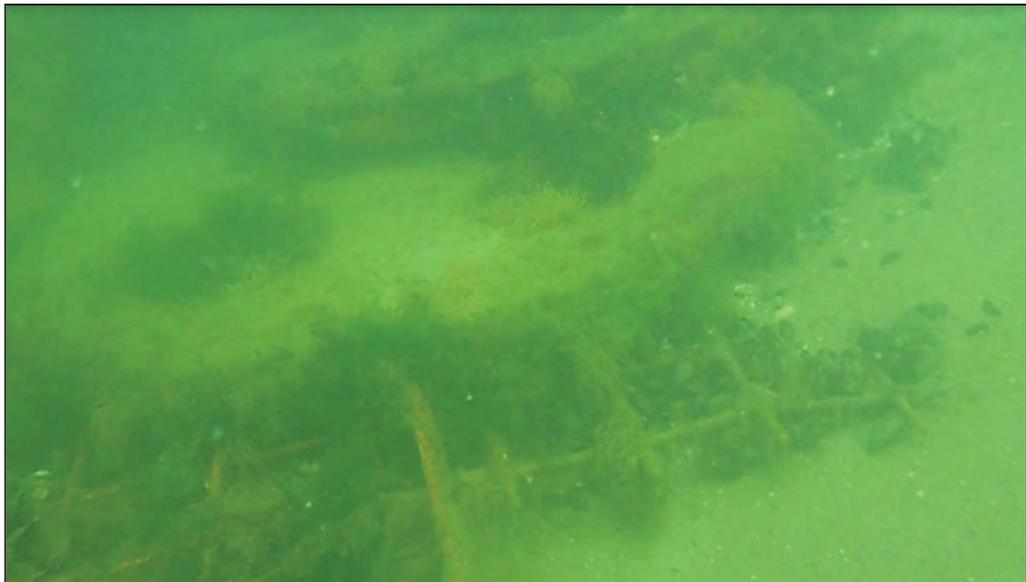


Fig. 9.15 - Foto subacquea del cedimento strutturale di un modulo del reef. Le piastre sono appoggiate sul fondo ed impilate l'una sull'altra. Giugno 2012.

In base alle indagini condotte sembra che in questo secondo periodo si sia comunque instaurato un processo di "riequilibrio" del litorale caratterizzato da trend deposizionali sui fondali meno profondi (tra l'area di intervento e la spiaggia emersa).

Il monitoraggio dell'area ha inoltre rilevato un assetto batimetrico notevolmente cambiato rispetto alle caratteristiche possedute prima dell'intervento di difesa. La morfologia dei fondali riscontrata risulta estremamente articolata e può essere definita come *strongly three-dimensional beach morphology* (Van Rijn and Walstra, 2004) (Fig. 9.16).

Infatti a partire dal rilievo effettuato in Marzo emerge la presenza di piccole barre ubicate tra -1,5 e -3,5 m , che vengono riscontrate anche nei rilievi successivi fino ad Ottobre 2012 (§ Cap. 8.1.2, Fig. 8.26, Fig. 9.16).

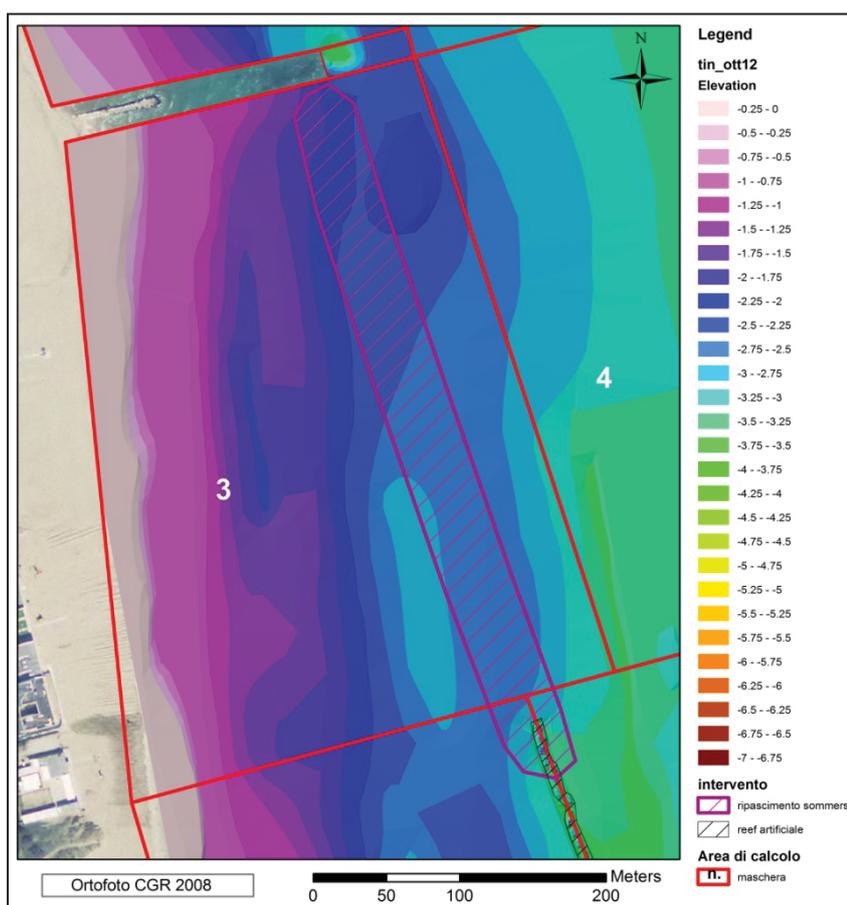


Fig. 9.16 - Mappa batimetrica relativa alla cella 3, del rilievo eseguito in Ottobre 2012.

In Fig. 9.17 si riporta la posizione delle barre rilevate negli ultimi tre rilievi. Per il rilievo di marzo (linee rosse) si possono fare le seguenti osservazioni:

- la barra settentrionale (linea rossa, P10-P13) è a circa 130 m di distanza da costa (*onshore* rispetto all'area ripasciuta) ed è lunga all'incirca 120 m;
- tra i transetti P13-P14 si registra una piccola barra a circa 250 m da riva;
- in corrispondenza della zona centrale (P15-P18), tra il ripascimento sommerso ed il reef, vi è la presenza di una barra più distante da costa (circa 340 m) che si sviluppa per circa 120 m;
- nel tratto più meridionale (P18-P20) vi sono due ordini di barre, estese non più di 80 m ed ubicate ad una distanza di 100 e 180 m da costa.

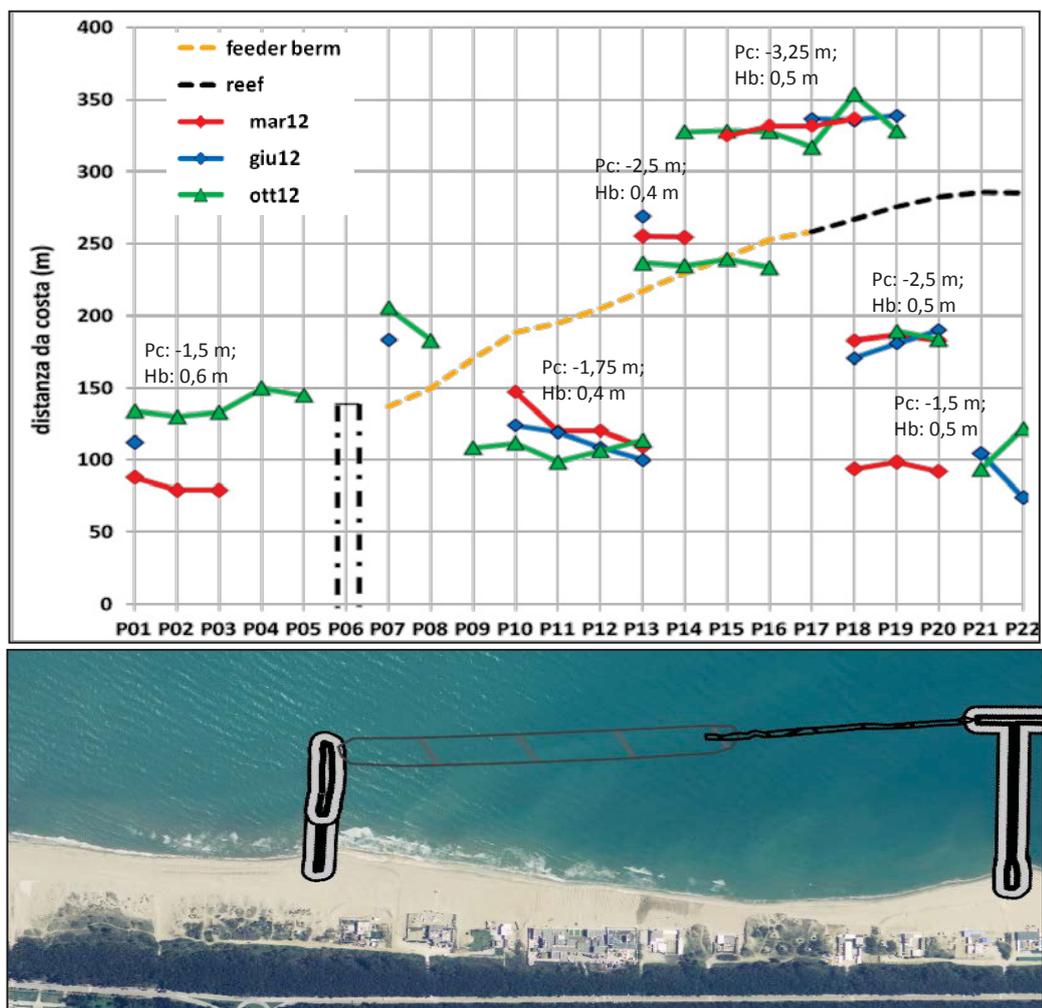


Fig. 9.17 – Ubicazione rispetto alla linea di riva e profondità delle barre da Marzo ad Ottobre 2012.

Nei rilievi successivi si evidenziano delle variazioni. Per quanto riguarda le barre dei profili P10-P13 si registra una rotazione dell'asse della barra, determinando un maggior allineamento con la linea di riva, con uno spostamento di circa 50 m ed un allungamento dello stesso asse verso Nord di circa 40 m (Ottobre 2012).

La barra rilevata tra i profili P13-P14 a circa 250 m da costa mostra una migrazione di circa 15 m *onshore* ed un allungamento di circa 40 m.

Quella tra i profili P15-P18, posizionata alle maggiori profondità, presenta un allungamento di circa 80 m ma è rimasta esattamente nella stessa posizione, così come quella presente sul fondale protetto dal *reef*.

Preme ricordare che la comparsa delle barre su questi fondali è un segnale del tutto nuovo, in quanto come già discusso nel paragrafo §6.7.2, è stata documentata la loro scomparsa a fine anni '80, in concomitanza con la realizzazione delle prime opere di difesa (barriere in sacchi), successivamente sostituite da quelle in massi.

Le mareggiate verificatesi nei mesi di Gennaio e Febbraio 2012 potrebbero aver indotto l'innescò della formazione di tali barre con delle discontinuità iniziali. Tali assetti morfologici potrebbero aver successivamente innescato una circolazione a celle che ha permesso il loro mantenimento. Simili comportamenti sono stati riscontrati in altri contesti (Wright & Short, 1984; Ranasinghe et al., 2004; Castelle et al., 2007).

Tenendo presente dell'effetto scala delle strutture difensive a Punta Marina (due pennelli ed alcune opere foranee) le dinamiche potrebbero essere comparate: episodi di mareggiata, con elevate altezze significative (nel caso specifico le due mareggiate già menzionate), sono in grado di innescare delle correnti importanti ed estremamente localizzate, in relazione alla poca distanza dall'opera.

Inoltre lo spostamento verso riva delle barre è probabilmente legato alla stagionalità (periodo estivo), come riportato anche da Wright and Short (1984), Lippmann and Holman (1990), Elgar et al. (2001), Van Enckevort and Ruessink (2003).

La stabilità della barra più al largo (profili 15-18) potrebbe essere ricondotta ad una situazione relitta: eventi di tempesta eccezionali ne determinano la formazione su fondali profondi; esse si conservano fino a che non si ripresenta una mareggiata con intensità tale da riattivarle (Larson and Kraus, 1992; Short and Aagaard, 1993).

## 10 Conclusioni e propositi di ricerca

---

Lo studio condotto ha riguardato l'evoluzione morfologica del tratto costiero di Punta Marina (RA) in cui, nella primavera 2010, è stato realizzato un intervento sperimentale consistito nella realizzazione di un ripascimento sia sommerso sia della spiaggia emersa e nella messa in opera di un *reef* artificiale (*Tecnoreef*) (§ 6.8).

Tale scelta è stata guidata dalla necessità di mitigare il fenomeno erosivo sul litorale (§ 6.7). I primi segnali del fenomeno erosivo sono stati registrati sui fondali testimoniato da un avvicinamento delle batimetriche a costa. Successivamente anche la linea di riva ha iniziato a regredire (dagli anni '80 circa -2 m/anno nonostante i numerosi interventi di ripascimento), accentuato dalla progressiva estensione verso Nord (e verso il litorale in esame) di opere rigide di difesa.

L'intervento è stato realizzato in un tratto costiero lungo circa 850 m, tra le barriere foranee (raccordate a pennelli) a Sud ed un pennello a Nord (§ 6.8). Il ripascimento della spiaggia emersa (19.000 m<sup>3</sup> di sabbia fine, 2 φ) e leggermente più sottile di quella nativa (1,9 φ in battigia) ha comportato un avanzamento medio della linea di riva di 30 m. Dal computo delle variazioni volumetriche, prima e dopo l'intervento, si può stimare un guadagno di circa 127.862 m<sup>3</sup> (0,17 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>), di cui circa 41.800 m<sup>3</sup> (83,6 m<sup>3</sup>/m) per la realizzazione del *feeder berm*. In realtà il volume di materiale effettivamente versato fu molto maggiore a causa delle condizioni marine spesso sfavorevoli che ne disperdevano una gran quantità durante le fasi operative. Una parte di tale materiale è comunque stato utilizzato anche per la riprofilatura della base di appoggio del *reef*. La *feeder berm* (altezza dal fondo circa 1,7 m, base circa 50 m, lunghezza circa 500 m) è stata posizionata a circa 200 m da costa, alla profondità di -2,7 m. Il *Tecnoreef*, costituito da 44 moduli piramidali, è stato messo in opera tra il ripascimento sommerso e le strutture rigide a Sud. I moduli presentavano le seguenti caratteristiche: altezza 1,73 m, larghezza base circa 5 m, lunghezza 7,8 m. Ogni modulo è composto da 51 piastre in calcestruzzo armato (Ø 118 cm, spessore 6 cm).

Il monitoraggio, durato due anni mezzo (Maggio 2010 - Ottobre 2012), si è svolto su un'area totale di circa 150 ha, a partire dalla duna (dove presente) o dallo stabilimento balneare fino alla batimetrica dei 6 m e per una lunghezza di circa 1,8 km. Sono stati eseguiti, oltre al rilievo pre-intervento, 9 rilievi topo-batimetrici (DGPS ed ecoscandaglio single-beam) dell'intera area, 2 rilievi batimetrici con ecoscandaglio multi-beam della zona in cui è stato posizionato il *reef*, 3 campagne di campionamento dei sedimenti di spiaggia emersa e fondali di cui due su di un'area vasta (70 campioni ciascuna) ed una intermedia della sola area di intervento (18 campioni). Tutti i dati raccolti sono stati inseriti all'interno di un *Geodatabase* in ambiente GIS, nel quale sono stati elaborate mappe batimetriche, TIN, mappe sedimentologiche e mappe di variazione di quota, e dove sono stati eseguiti confronti e computi volumetrici (§ Cap. 7). Durante l'intero periodo sono stati raccolti ed analizzati i dati ondametrici, successivamente confrontati con la dinamica morfo-sedimentaria.

Complessivamente il bilancio sedimentario computato per l'intera area rilevata, dalla fine dei lavori a Ottobre 2012, è positivo (+67.974 m<sup>3</sup>; +0,04 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>), con circa 30.827 m<sup>3</sup> (+0,04 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) di variazione positiva riscontrata nelle quattro celle interessate dall'intervento (§. 8.1.2).

Lo studio ha evidenziato il progressivo smantellamento del ripascimento sommerso ed un accumulo di sedimento *onshore* (sia dietro il ripascimento sia in parte dietro al *reef*). Il bilancio volumetrico computato dallo stato precedente ai lavori (Febbraio 2010) all'ultimo rilievo eseguito (Ottobre 2012) stima circa +66.700 m<sup>3</sup> (+0,29 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) di sedimento depositato tra la linea di riva e la zona di intervento (*feeder berm* e *Tecnoreef*). Ciò sembra confermare le ipotesi che hanno suggerito la sua realizzazione: i sedimenti provenienti dallo smantellamento della *feeder berm*, operato dal frangimento delle onde, ha favorito l'alimentazione dei fondali meno profondi prossimi a costa (dietro la zona di ripascimento) in sintonia con quanto riferito da Grunnet and Ruessink (2005) e Van Duin et al. (2004). L'innalzamento di questi fondali ha favorito la dissipazione dell'energia delle onde prima che raggiungessero la spiaggia emersa (Spanhoff et al., 1997). Questo ha contribuito, alcuni mesi dopo l'esecuzione del ripascimento, alla stabilità della linea di riva, come documentato in Olanda, Danimarca,

Florida e California da alcuni lavori (Grunnet et al., 2005; Johnson et al., 2001; Brutsche et al., 2012; Juhnke et al., 1990), e consentito un recupero della sua estensione, dopo perdite significative nei primi 7 mesi (-2,7 m/mese) a seguito del naturale rimaneggiamento del mare ed a causa del materiale di prestito leggermente più sottile di quello nativo e pertanto non ottimale per il ripascimento (§ 8.1.1).

A conferma dei buoni risultati giova ricordare che, mentre nell'anno precedente i lavori il tasso di arretramento medio era di -6,6 m/anno. Inoltre, confrontando la posizione della linea di riva subito prima dei lavori con quella rilevata ad Ottobre 2012, dopo 32 mesi è avanzata di circa 5,3 m (tenendo conto sia dell'intervento di ripascimento sia della importante perdita iniziale); è dunque evidente una attenuazione del fenomeno erosivo nell'area dell'intervento (Fig. 10.1).

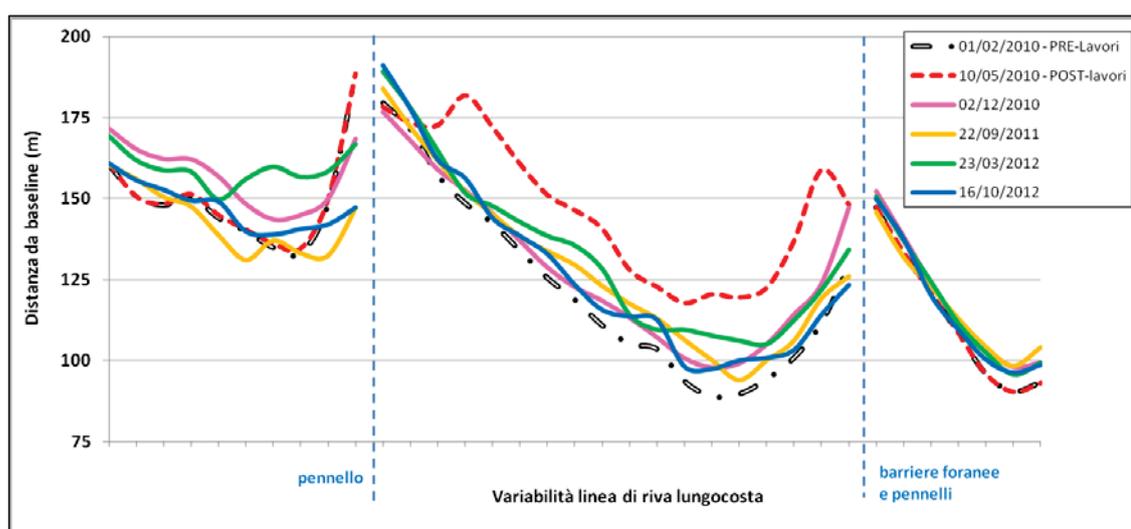


Fig. 10.1 - Posizione della linea di riva da prima dei lavori (Febbraio 2010, linea - punti nera) ad Ottobre 2012 ( linea blu). La linea rossa tratteggiata rappresenta la posizione a fine ripascimento. (Asse X: equidistanza 50 m; asse Y: distanza da una baseline tracciata dietro agli stabilimenti balneari).

Le indagini sedimentologiche confermano questa migrazione, mostrando, nel tempo, lo spostamento del sedimento costituente la *feeder berm*, più grossolano (2,5  $\phi$ ) rispetto a quello nativo (3 - 3,5  $\phi$ ), verso costa e verso meridione. Ricordando che, nei due anni e mezzo di monitoraggio, sono prevalsi i mari provenienti da NE (§ 8.3) la migrazione dei sedimenti verso meridione è oltremodo realistica.

Queste considerazioni sono sostenute anche dall'applicazione dei moduli di propagazione del moto ondoso e idrodinamico (SW-FM "Spectral Waves - Flexible Mesh" e FM-FM "Flow Model – Flexible Mesh", MIKE 21, DHI) e del modello morfologico (applicativo ST-FM *Sediment Transport – Flexible Mesh*). Infatti le simulazioni condotte per il periodo di osservazione (Simeoni et al., 2011; Utizi et al., 2012) , mostrano una riduzione dell'altezza dell'onda sulla cresta della *feeder berm* ed una riduzione della velocità della corrente generata dal moto ondoso in corrispondenza dell'area di *feeder berm*. Le simulazioni sono state condotte sia con la configurazione batimetrica di fine intervento sia con quella dopo 7 mesi (Dicembre 2010), quando il ripascimento aveva già perso gran parte del suo volume. Inoltre riproducono con sufficiente dettaglio qualitativo le tendenze erosive della *feeder berm* e gli innalzamenti del fondale, messi in evidenza dal confronto dei rilievi effettuati (§ Cap.8.1).

E' stata invece osservata una sostanziale inefficienza del *reef* artificiale (*Tecnoreef*) nella protezione della spiaggia emersa dall'erosione, non per quanto riguarda la linea di riva (che ha probabilmente beneficiato della migrazione *longshore* dei sedimenti durante le mareggiate) quanto per le significative perturbazioni che hanno subito i fondali sia verso costa che verso il largo della struttura (§ 8.1.2). Sono infatti state rilevate profonde escavazioni del fondale sia in corrispondenza della base delle strutture che nell'area circostante (oltre 100 m). Tale abbassamento dei fondali, già osservato in letteratura (Ranasinghe et al., 2001; Smith et al., 1998; Simioni and Esteves, 2010), è stato più intenso nella porzione meridionale della struttura (una perdita di quota di circa -0,7 m a Nord e di -2,2 m a Sud, § Cap. 8.1.2): Infatti i fenomeni di escavazione, ben evidenziati dai rilievi multi-beam, sembrano essere stati parzialmente compensati a settentrione dall'arrivo di sedimento proveniente dallo smantellamento della *feeder berm* ed accentuati a meridione dalle opere rigide.

La distribuzione della tessitura dei sedimenti sia in Dicembre 2010 che in Ottobre 2012 (§ Cap.8.2) mostra una fascia di sedimento più grossolano (2-2,5  $\phi$ ) rispetto all'area circostante (da 3 a 3,5  $\phi$ ) disposta perpendicolarmente alla costa e che oltrepassa il *Tecnoreef*. Questo suggerisce la presenza di correnti *cross-shore* che

disperdono il materiale verso il largo. La struttura del *reef* (semipermeabile) non favorisce l'intrappolamento di questi materiali che vanno a depositarsi a profondità più elevate.

Inoltre le ispezioni subacquee condotte nell'ambito della verifica strutturale del *Tecnoreef* commissionata dal Comune di Ravenna (§ Cap.9) hanno evidenziato come all'interno delle strutture non vi siano accumuli di sedimento, tanto che la rete elettrosaldata ed il geotessuto su cui era stato posato il *Tecnoreef* risulta quasi sempre ben visibile. Ciò potrebbe essere correlato alla turbolenza che si crea all'interno delle strutture quando l'onda viene dissipata che potrebbe favorire un effetto caritativo.

Queste considerazioni ricevono conferma dalle simulazioni condotte tramite l'applicazione del modello numerico (MIKE 21, DHI) le quali evidenziano l'instaurarsi di correnti dirette verso il largo attraverso il *reef*. Il modello pur presentando dei limiti circa la riproduzione della struttura (definizione dei parametri di permeabilità), sostanzialmente avvalorava quanto emerso dallo studio batimetrico e sedimentologico.

Un'altra nota negativa è costituita dal cedimento e disassamento della struttura, messa in evidenza dai rilievi multi-beam (Maggio 2011 e Giugno 2012) e dalle ispezioni subacquee. Il collasso di alcuni moduli, la rottura ed il dislocamento delle piastre che li compongono, oltre a presentare una minaccia per la balneazione, sottolineano l'incapacità del *Tecnoreef* di resistere alle forzanti marine e quindi di costituire una efficiente difesa per l'erosione della costa.

La valutazione della performance della *feeder berm* può essere fondamentale così descritta:

- sembrano confermati gli stessi trend osservati nelle esperienze estere (Paesi Bassi, Germania, Danimarca, Stati Uniti) con smantellamento dell'accumulo, migrazione dei sedimenti *onshore*, innalzamento dei fondali, maggior dissipazione dell'energia del moto ondoso e stabilizzazione della linea di riva (Spanhoff et al., 1997; Johnson et al., 2001; Grunnet et al., 2004; van Duin et al., 2004; Grunnet and Ruessink, 2005; Brutsche et al., 2012);
- la durata di tali effetti (protezione ed alimentazione) sembra sensibilmente inferiore rispetto ai casi del Nord Europa, dove si osservava un primo effetto di

sola dissipazione dell'energia ondosa e solo dopo 1 o 2 anni si osservava la migrazione dei sedimenti onshore e la conseguente alimentazione della spiaggia (che durava fino a 5 - 7 anni);

- la spiegazione di tali differenze risiede nelle diverse caratteristiche del ripascimento sommerso per quanto riguarda i volumi in gioco ( $83,6 \text{ m}^3/\text{m}$  di Punta Marina contro i  $200\text{-}450 \text{ m}^3/\text{m}^2$  dei casi olandesi), le profondità di versamento (2,7 m di Punta Marina contro i 4-8 m dei casi olandesi, danesi o americani), tessitura del sedimento versato (diametro medio  $2,2\phi$  più grossolano rispetto al sedimento nativo ( $3,2 \phi$ ) alla -3 m, ma più fine rispetto alla spiaggia ( $1,9 \phi$ ) di Punta Marina contro i sedimenti di prestito più grossolani rispetto alla battigia nei casi olandesi)

La valutazione della performance della messa in opera del *Tecnoreef* può essere così sintetizzata:

- il *reef* artificiale non risulta idoneo come soluzione difensiva perché troppo fragile anche per i nostri climi ondosi;
- la struttura non riesce a far frangere completamente l'onda perché le sue dimensioni sono troppo limitate e la cresta troppo stretta (Aminti et al., 1983; Lamberti et al., 1985; Smith and Kraus, 1982);
- il reef, benché sia una struttura semipermeabile, innesca quei fenomeni di scalzamento alla base, tipici delle opere impermeabili, sia sui fondali interni che esterni (Ranasinghe et al., 2001; Simioni and Esteves, 2010);
- la struttura presenta una scarsa capacità di intrappolamento del sedimento; ciò favorisce l'istaurarsi di correnti *cross-shore* che lo disperdono verso il largo;
- il reef svolge egregiamente la funzione di nursery e favorisce il formarsi di una nicchia ecologica come evidenziato nelle ispezioni subacquee.

La realizzazione della *feeder berm* ha dunque mostrato una buona *performance* ed ha dimostrato la possibilità di utilizzare del sedimento non idoneo per i ripascimenti della spiaggia emersa (perché troppo sottile e quindi non compatibile) per la difesa

costiera dall'erosione. Inoltre l'implementazione di questa tipologia di ripascimento potrebbe risolvere alcuni problemi di smaltimento di sabbie fini (ad esempio provenienti da dragaggi portuali) altrimenti posti in casse di colmata o sversati su fondali profondi.

Dati ottenuti dalla partecipazione ad un progetto Europeo Life "Sedi.Port.Sil" mostrano la disponibilità di circa 400.000 m<sup>3</sup> di sabbie fini e non contaminate idonee per i ripascimenti sommersi (Rodella et al., 2012).

La combinazione di ripascimenti sommersi e ripascimenti della spiaggia emersa garantirebbe la conservazione per tempi più lunghi del materiale versato sull'arenile, allungando i tempi di ricarica e riducendo quindi i costi che ne derivano.

Altro punto di interesse è emerso dai rilievi condotti nell'ultimo periodo di monitoraggio nei quali è stata rilevata la formazione di "neo-barre" di limitata dimensione (Hb tra 0,4 e 0,6 m), discontinue e a diverse profondità (tra -1,75 e -3,25 m) (§. 8.1.2.1 e § Cap.9).

La loro presenza nell'area di studio è stata documentata fino a fine anni '80 con un loro massimo sviluppo negli anni '70 (Hb 0,8 m). La loro scomparsa è coincisa con la progressiva estensione verso Nord delle opere rigide difensive e con l'aggravarsi di un bilancio sedimentario in deficit (§. 6.7.2). Le ricerche bibliografiche condotte (§ Cap. 4.4) ha infatti evidenziato come la natura delle barre sia estremamente variabile in relazione alle variazioni delle condizioni al contorno e, in primis, alla messa in opera di difese rigide (Simeoni, 1989; Shand et al., 2001; Ruessink et al., 2003, Pape et al., 2010).

Nel caso di Punta Marina, dopo però circa 30 anni, viene documentata con il rilievo di Marzo 2012 la presenza di barre, anche se di piccole dimensioni. Tale rilievo è stato eseguito a seguito di diverse mareggiate tra cui 2 con altezza e durata eccezionali. Le barre poi si mantengono per i sette mesi successivi, fino all'ultimo rilievo eseguito.

La loro formazione potrebbe essere legata al surplus di materiale che è stato immesso nel sistema litorale con il ripascimento. L'assetto batimetrico che ne risulta è ulteriormente modificato e potrebbe essere definito *strongly three-dimensional beach morphology* (Van Rijn and Walstra, 2004).

Ricordando che le barre:

- influenzano in maniera determinante il regime idrodinamico e sedimentario non solo della zona di surf ma di tutto il sistema costiero ad essa connesso (Wijnberg & Terwindt, 1995; Plant et al., 2001),
- hanno un ruolo fondamentale nell'evoluzione della linea di riva (Guillen et al., 1999; Armaroli et al., 2005),

emerge che una progettazione delle dimensioni più accurata della morfologia della *feeder berm*, della posizione e profondità di realizzazione, dei volumi da impiegare potrebbe riattivare quelle dinamiche naturali che favoriscono la formazione delle barre. Inoltre evidenzia come la realizzazione di *feeder berm* potrebbe rappresentare una soluzione efficace per la protezione costiera, diminuendo così la messa in opera di opere rigide che molto impattano sulla dinamica idrosedimentaria.

Proprio per tali ragioni si intende proseguire lo studio sui ripascimenti sommersi, valutando nuove caratteristiche progettuali. Inoltre, si intende proseguire con il monitoraggio e lo studio dell'area indagata, con la volontà di verificare se le barre di recente formazione siano legate alle eccezionali mareggiate occorse o se rappresentino un innesco per una loro presenza costante nel litorale in oggetto.

## 11 Bibliografia

---

- AA. VV., 1999. Atlante delle spiagge italiane. CNR-MURST, S.EL.CA. Editore: 108 Tavole.
- AA.VV., 2006. Analysis of correlation between coast evolution and meteo-marine climatology. Technical report (June 2006). CADSEALAND WP04: Integrated informative system to support protection strategies. Deliverable 4.5, pp. 115.
- AA.VV., 2007. Manuale per la Movimentazione dei sedimenti marini. Ministero dell'ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare; ICRAM, APAT.
- AA.VV., 2010. Foce Bevano- L'area naturale protetta e l'intervento di salvaguardia. Regione Emilia-Romagna, Bologna: 60 pp.
- Aagaard T., Davidson-Arnott R., Greenwood B., Nielsen J., 2004. Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution. *Geomorphology*, 60: 205–224.
- Aagaard T., Masselink G., 1999. The surf zone. In: SHORT, A.D. (editor), *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Chichester, Wiley: 72-118.
- Aagaard, T., 1990. Infragravity waves and nearshore bars in protected, storm dominated coastal environments. *Mar. Geol.* 94: 181– 203
- Aagaard, T., Nielsen, J., Greenwood, B., 1998. Suspended sediment transport and nearshore bar formation on a shallow intermediate-state beach. *Mar. Geol.* 148: 203-225.
- Allison M.C., Pollock C.B., 1993. Nearshore Berms: An Evaluation of Prototype Designs. Coastal Zone '93. American Society of Civil Engineers: 2938-2950.
- Aminti P., Lamberti A. e Liberatore G., 1983. Indagini sperimentali su barriere sommerse per la difesa della spiaggia. *Note e Pub. di Ing. Idr.*, 30, Università di Firenze, pp. 22.

- Aminti P., Zanuttigh B., Lorenzoni C., Martinelli L., Clementi E., 2005. Esperimenti di laboratorio ed osservazioni di campo sulle modifiche indotte al fondo da opere trascinabili. *Studi costieri*, 9: 159-190.
- Aminti P.L., Verzoni M., 1993. Intervento di riequilibrio sul litorale di Cecina Mare. In: Aminti e Pranzini (Ed.), *La difesa dei litorali in Italia*. Edizioni delle Autonomie, Roma: 103-119.
- Amorosi A., Colalongo M.L., Pasini G., Preti D., 1999. Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (Northern Italy). *Sedimentology*, 46: 99-121.
- Amorosi A., Farina M., 1995. Large-scale architecture of a thrust-related alluvial complex from subsurface data: the Quaternary succession of the Po Basin in the Bologna area (northern Italy). *Giornale di Geologia*, 57(1-2): 3-16.
- Antoniazzi A., 1976. *L'erosione marina nel litorale fra Cervia e Pesaro*. Camera Com. Ind. Ari. Agr. Forlì: 161 pp.
- APAT, 2007. *Atlante delle opere di sistemazione costiera*. Manuale APAT, Agenzia per la protezione dell'Ambiente e per i servizi tecnici.
- Armaroli C., Ciavola P., 2011. Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: A video-based morphological classification. *Geomorphology*, 126: 201-216.
- Armaroli C., Ciavola P., Caleffi S., Gardelli M., 2007. Morphodynamics of nearshore rhythmic forms: an energy-based classification. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, San Diego, CA, USA*, 4: 4009-4021.
- Armaroli C., Ciavola P., Perini L., Calabrese L., Lorito S., Valentini A., Masina M., 2012. Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology*, 143-144: 34-51.
- ARPA-Emilia-Romagna 2002. *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2000*. I quaderni di Arpa. Regione Emilia-Romagna, Bologna.

- ARPA-Emilia-Romagna, 2009. Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007. I quaderni di Arpa, Regione Emilia -Romagna, Bologna.
- Aubrey D.G., 1979. Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement. *J. Geophys. Res.*, 84: 6347–6354.
- Bagnold R.A., 1941. *The physics of blow sand and desert dunes*. Chapman and Hall, London, 265 pp.
- Battjes J.A., Janssen J.P.F.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proceedings Coastal Engineering*. ASCE: 569-587.
- Benassai E., Gentilomo M., Ragone A., Setaro F., Tomassichio U., 1997. Littoral Restoration by means of Protected Beach Nourishment - Recent Italian Works. *PIANC Bulletin*, 94, PIANC, 43-55.
- Bernhardsen T., 1992. *Geographic Information Systems*. VIAK IT and Norwegian Mapping Authority, Arendal, Norway.
- Bertoni W., Carbognini L, Gatto P., Mozzi G., 1973. Note interpretative preliminari sulle cause della subsidenza in atto a Ravenna. *Cam. Ravenna-C.N.R. Venezia*: 34 pp.
- Billi P., Ciavola P., Boettger C., Salemi E., Preciso E., 2007. Trasporto solido dei Fiumi Uniti e dinamica della zona di foce. IN: E. Ferrucci, Pianificazione del territorio costiero, San Arcangelo di Romagna, Maggioli: 333-361.
- Black K.P., 2001. Artificial Surfing Reefs for Erosion Control and Amenity: Theory and Application. *Special Issue of Journal of Coastal Research, International Coastal Symposium (ICS2000) Rotorua, New Zealand, April 2000*.
- Boak E.H., Turner I.L., 2005. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 21 (4): 688-703.
- Boccotti P., 1997. *Idraulica Marittima*. Utet, Torino.
- Boczar-Karakiewicz B., Davidson-Arnott R.G.D., 1987. Nearshore bar formation by non-linear wave processes—a comparison of model results and field data. *Mar. Geol.* 77: 287– 304.

- Bondesan M., Calderoni G., Dal Cin R., 1978. Il litorale delle province di Ferrara e Ravenna (Alto Adriatico): evoluzione morfologica e distribuzione dei sedimenti. *Boll. Soc. Geol. It.*, 97, 247-287.
- Bondesan M., Dal Cin R., 1975. Rapporti fra erosione lungo i litorali emiliano-romagnoli e del delta del Po, e attività estrattiva negli alvei fluviali. In "Cave e assetto del territorio", Italia Nostra - Reg. Emilia Romagna. Bologna: 125-137.
- Bondesan M., Dal Cin R., 1976. Considerazioni sull'evoluzione morfologica e la distribuzione dei sedimenti nel tratto di costa tra Volano (FE) e la foce del Savio (RA). In: *Ricerche sul Regime e la Conservazione dei Litorali*. C.N.R., Quad. Ric. Scient., 92: 33-35.
- Bondesan M., Favero V., Vinals M.J., 1995. New evidence on the evolution of the Po delta Coastal Planning during the Olocene. *Quaternary International*, 29/30: 105-110.
- Bondesan M., Simeoni U., 1983. Dinamica e analisi morfologica statistica dei litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta. *Mem. Sc. Geol.*, 36: 1-48.
- Borrero J.C., Nelsen C., 2003. Results of a comprehensive monitoring program at Pratte's Reef. *Proc. 3rd Intern. Surfing Reef Symposium*, Raglan, New Zealand.
- Bowen A. J., Inman D. L., 1969. Rip currents. Laboratory and field observations, *J. Geophys. Res.*, 74: 5479-5490.
- Bowen A.J., 1980. Simple models of nearshore sedimentation; beach profiles and longshore bars. In: McCann, S.B. (Ed.), *The Coastline of Canada*. *Geol. Surv. Can. Pap. 80-10*: 1-11.
- Bowen A.J., Inman D.L., 1971. Edge waves and crescentic bars. *J. Geophys. Res.*, 76: 8662-8670.
- Bowman D., Goldsmith V., 1983. Bar morphology of dissipative beaches: an empirical model. *Mar. Geol.* 51: 15- 33.
- Bretschneider C.L., 1952. The generation and decay of wind waves in deep water. *Trans. A.G.U.*, 33(3): 381-389.

- Bretschneider C.L., 1958. Revision in wave forecasting deep and shallow water. Proc. 6th Conf. on Coastal Eng.: 30–67.
- Browder, A.E., Dean, R.G., Chen, R., 2000. Performance of submerged breakwater for shore protection. Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering, Sydney, Australia: 2312–2323.
- Brutsche K.E., Wang P., 2012. First Year Morphological Evolution of an Artificial Berm at Fort Myers Beach, Florida. Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note, ERDC/CHL CHETN-II-54, U.S.A.C.E.: 10 pp.
- Bryan K.R., Bowen A.J., 1996. Edge waves trapping and amplification on barred beaches. J. Geophys. Res., 101:6543-6552.
- Bryan K.R., Bowen A.J., 1998. Bar-trapped edge waves and longshore currents. J. Geophys. Res. 103 (C12): 27867–27884.
- Caballeria M., Coco G., Falqués A., Huntley, D.A., 2002. *Self-organization mechanisms for the formation of nearshore crescentic and transverse sand bars*. J. Fluid Mech. 465: 379–410.
- Caputo M., Pieri L., Unguendoli M , 1970. Geometric investigation of the subsidence in the Po Delta. C.N.R., Laboratorio per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Venezia.
- Carter R.W.G., 1988. Coastal Environments. Academic Press, London, 617 pp
- Carter T.G., Liu P.L., Mei C., 1973. Mass transport by waves and offshore sand bedforms. J. Waterw. Harbors Coastal Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng., WW2: 165-184.
- Castelle B., Le Corre Y., Tomlinson R.B., 2008. Can the Gold Coast beaches withstand extreme events? Geo-Marine Letters, 28: 23–30.
- Chapell J., Eliot I.G., 1979. Surf-beach dynamics in time and space—an Australian case study, and elements of a predictive model. Mar. Geol., 31: 231–250.
- Charlier R.H. and De Meyer C.P., 2000. Ask nature to protect and build-up beaches. Journal of Coastal Research, 16 (2): 385-390.

- Ciabatti M., 1968. Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano. *Giornale di Geologia*, XXXIV: 318- 410.
- Ciabatti M., Giorgi G., Marabini F., 1978. Variazioni della spiaggia lungo il litorale emiliano-romagnolo. 2-Litorale ravennate. Ed. Pitagora, Bologna:67 pp.
- Ciavola P., Salemi E., Billi P., 2010. Sediment supply and morphological evolution of a small river mouth (Fiumi Uniti, Ravenna, Italy): should river management be storm-driven?. In: M. Barazzutti, F. Marabini: China-Italy Bilateral Symposium on the Coastal Zone and Continental Shelf Evolution Trend. BOLOGNA:Albisani Editore: 104-113.
- CNR, 2005. Wind and Waves Atlas of Mediterranean Sea. Western European Union.
- Coco, G., Caballeria, M., Falqués, A., Huntley, D.H., 2002. *Crescentic bars and nearshore self-organization processes*. In: Smith, J.M. (Ed.), Coastal Engineering 2002, vol. 3. World Scientific, Singapore: 3765–3777.
- Comune di Ravenna, 2002. Master plan della costa ravennate. Rapporti tecnici.
- Corsini S., Inghilesi R., Franco L., Piscopia R., 2004. Atlante delle onde nei mari italiani - Italian Wave Atlas. Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT) e Università di Roma 3.
- CUR, 1997, Beach nourishments and shore parallel structures, R97-2, PO. Box 420, Gouda, NL
- Dal Cin R., Simeoni U. (1987) - Analisi ambientale quantitativa dei litorali marchigiani fret Gabicce ed Ancona. Livello del rischio naturale e del degrado, distribuzione dei sedimenti e loro possibile impiego per ripascimenti artificiali. *Bollettino Society Geologica Italiana*, 106: 377-423.
- Dal Cin R., Simeoni U., 1994. A model for determining the classification, vulnerabilità and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy). *Journal of Coastal Research* 10(1), 18-29.
- Dal Cin R., Simeoni U., 1994. Variazioni volumetriche del delta padano nell'ultimo secolo, distribuzione dei sedimenti nei rami deltizi e caratteri granulometrici dei

- materiali cavati nel basso Po. 2° Convegno di Idraulica Padana, Parma, 1-8: 255-279.
- Dally W.R., 1987. Longshore bar formation—surf beat or undertow? Proceedings Coastal Sediments '87. ASCE, New York: 71– 86.
- Dally W.R., Dean R.G., 1984. Suspended sediment transport and beach profile evolution. *J. Waterw., Port Coast Ocean Eng.*, 110 (1): 15– 33.
- Darlymple R.A., 1992. Prediction of storm/normal beach profiles. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 118: 193-200.
- Davidson-Arnott R.G.D, 1981. Computer simulation of nearshore bar formation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6: 23-34.
- Davidson-Arnott R.G.D., 1988. Controls on formation of barred nearshore profiles. *The Geographical Review*, 78: 185-193.
- Dean R.G., 1973. Heuristic model of sand transport in the surf zone. Proceedings of engineering dynamics in the surf zone, Institute of Engineers, Australia: 208-214.
- Dean R.G., 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. *Ocean Engineering Tech. Report*, 12, Dept. of Civil Engineering, University of Delaware.
- Dean R.G., 1991. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *J. Coastal Research*, 7(1): 53-84.
- Dean R.G., 2002. Beach nourishment, theory and practice. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 18: pp. 399.
- Dean R.G., Chen R. e Browder A.E., 1997. Full Scale Monitoring Study of a Submerged Breakwater. *Coastal Engineering*, 29: 291-315.
- Dettinger H. H., Raudkivi A. J., 1994. Beach nourishment and dune protection. *Coastal Engineering*, Cap.139: 1934-1945.
- DHI, 2003a. LITDRIFT - Longshore Current and Littoral Drift. LITDRIFT USER GUIDE.
- DHI, 2003b. LITPROF – Profile development. LITPROF USER GUIDE.

- Dolan R., Hayden B.P., May P. and May S.K., 1980. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48(4): 22-29.
- Dolan R.; Fenster M.S. and Holme S.J., 1991. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3): 723-744.
- Dyhr-Nielsen M., Sørensen T., 1970. Some sand transport phenomena on coasts with bars. *Proceedings 12th ICCE. ASCE, New York*: 855–866.
- Elgar S., Gallagher E.L., Guza R.T., 2001. Nearshore sandbar migration. *Journal of Geophysical Research*, 106: 11623–11627.
- Evans, P., Ranasinghe, R., 2001. Artificial surfing reefs: a new paradigm in coastal protection. *Proc. Coasts and Ports F01, Gold Coast, Australia. IEAust*: 128–133.
- Fabbri P., 1987. *Le bonifiche d'età moderna. Costruire un territorio*. Longo Editore, Ravenna.
- Falqués A., Montoto A., Iranzo V., 1996. Bed-flow instability of the longshore current. *Cont. Shelf Res.*, 16 (15): 1927– 1964.
- Farabegoli E., Onorevoli G., Ruffino C., Costantini B., 1998. Quadro stratigrafico e geomorfologico. *Struttura del sottosuolo della Pianura Padana meridionale (Provincia di Ravenna – Italia)*. AGIP, Geodinamica e Ambiente.
- Fontolan G., 2003. Jumeira Beach – Results of the monitoring surveys during September 2002 and August 2003. *Tech. Rep.*
- Gallagher E.L., Elgar S., Guza R.T., 1998. Observations of sand bar evolution on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 103: 3203–3215.
- Gardelli M., Caleffi S., Ciavola P., 2007. Evoluzione morfodinamica della foce del torrente Bevano. *Studi Costieri*, 13: 55-76.
- Goldsmith V., Bowman D., Kiley K., 1982. Sequential stage development of crescentic bars: Ha Hoterim Beach, southeastern Mediterranean. *J. Sediment. Petrol.* 52:233-249.
- Gourlay M.R., 1968. *Beach and Dune Erosion Tests*. Delft Hydraulics Laboratory Report No. M935/M936. Delft, The Netherlands

- Greenwood B., Davidson-Arnott R.G.D., 1979. Sedimentation and equilibrium in wave-formed bars: a review and case study. *J. Earth Sci.*, 16: 312–332.
- Grottoli E., Ciavola P., 2012. Morfodinamica e risposta a corto e medio termine ad eventi di mareggiata delle spiagge comprese tra Foce Bevano e Lido di Classe (RA). *Studi Costieri*, 20: 25-46.
- Grunnet N.M., 2002. *Post-Nourishment Volumetric Development at Terschelling*. Department of Physical Geography, University of Utrecht, Utrecht, The Netherlands.
- Grunnet N.M., Ruessink B.G., 2005. Morphodynamic response of nearshore bars to a shoreface nourishment. *Coastal Engineering*, 52: 119– 137.
- Grunnet N.M., Walstra D.J.R., Ruessink B.G., 2004. Process-based modelling of a shoreface nourishment. *Coastal Engineering*, 51: 581–607.
- Guillen J., Stive M.J.F., Capobianco M., 1999. Shoreline evolution of the Holland Coast on a decadal scale. *Earth Surf. Process. Landforms*, 24: 517-536.
- Gumbel E.J., 1960. Bivariate exponential distributions. *Journal of the American Statistical Association*, 55: 698-707.
- Guza R.T., Inman D.L., 1975. Edge waves and beach cusps. *J. Geophys. Res.*, 80: 2997-3012.
- Hallermeier R.J., 1981. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4: 253-277.
- Hamm L., Capobianco M., Dette H.H., Lechuga A., Spanhoff R. and Stive M.J.F., 2002. A summary of European experience with shore nourishment. *Coastal Engineering*, 47: 237–264.
- Hands E.B., Allison M.C., 1991. Mound migration in deeper water and methods of categorizing active and stable depths. *Coastal Sediments*, Seattle, USA: 1985-1999.
- Hanson H., Brampton A., Capobianco M., Dette H.H., Hamm L., Laustrup C., Lechuga A and Spanhoff R., 2002. Beach nourishment projects, practices and objectives – an European overview. *Coastal Engineering*, 47: 81 – 111.

- Hanson H., Kraus N.C., 1990. Shoreline response to a single transmissive detached breakwater. Proc. 22nd International Conference on Coastal Engineering, Delft, The Netherlands. ASCE: 2034– 2046.
- Harris L.E., 2003. Artificial reef structures for shoreline stabilization and habitat enhancement. 3rd International Surfing Reef Symposium, ASR, Ltd., Raglan, New Zealand.
- Harris L.E., 2009. Artificial Reefs for Ecosystem Restoration and Coastal Erosion. Protection with Aquaculture and Recreational Amenities. Reef Journal. 1(1): 235-246.
- Harris L.E., Turk G., Mead S., 2004. Combined recreational amenities and coastal erosion protection using submerged breakwaters for shoreline stabilization. Beach Preservation Technology 2004, FSBPA.
- Hobson R.D., 1977. Review of design elements for beach fill evaluation. T.P. 77-6, CERC, US Army Corps of Engineers, Fort Belvoir.
- Hoefel F., Elgar S., 2003. Wave-induced sediment transport and sandbar migration. Science 299 (5614): 1885–1887.
- Hoekstra P., Houwman K.T., Kroon A. Van Vessem P., Ruessink B.G., 1994. The NOURTEC experiment of Terschelling: process-oriented monitoring of a shoreface nourishment (1993–1996). In: Arcilla, A., Stive, M.J.F., Kraus, N.C. (Eds.), Proc. 1st Int. Conf. on Coastal Dynamics '94. ASCE, New York: 402– 416.
- Holman R.A. and Sallenger A.H., 1993. Sand Bar Generation: A Discussion of the Duck Experiment Series. J. Coastal Research, S.I. 15: 76-92.
- Hsu S. A, 1974. Computing eolian sand transport from routine weather data. Proc of 14th International Conference on Coastal Engineering, ASCE: 1319-1326.
- Hulscher S.J.M.H., 1996. Formation and migration of large-scale, rhythmic sea-bed patterns: a stability approach. PhD thesis, Utrecht University, 143 pp
- Hulscher S.J.M.H., de Swart H.E., de Vriend H.J., 1993. The generation of offshore tidal sand banks and sand waves. Cont. Shelf Res. 13 (11): 1183– 1204.

- IDROSER, 1981. Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola. Rapporto, Bologna.
- IDROSER, 1996. Progetto di Piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna. Rapporto, Bologna.
- IPCC,2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment.
- Jackson L.A., Corbett B.B., 2007. Review of Existing Multi-Functional Artificial Reefs. Australasian Conference on Coast and Ports 2007.
- James J.R., 1974. Borrow Material Texture and Beach Fill Stability. Proceedings, 14th International Conference on Coastal Engineering. ASCE: 1334-1344.
- James J.R., 1975. Techniques in Evaluating Suitability of Borrow Material for Beach Nourishment. Technical Memorandum, 60, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Johnson H.K., Appendini C.M., Soldati M., Elfrink B., Sørensen P., 2001. Numerical modelling of morphological changes due to shoreface nourishment. Proc of the 4th Conference on Coastal Dynamics, American Society of Civil Engineers, Lund, Sweden, June 2001: 878-887.
- Juhnke L., Mitchell T., Piszker M.J., 1990. Construction and Monitoring of Nearshore Disposal of Dredged Material at Silver Strand State Park, San Diego, Calif. Proceedings of the Western Dredging Association Conference, Las Vegas, Nevada. Fairfax, Virginia: Western Dredging Association.CDS Report , 321: 203–217.
- Keulegan G.H., 1948. An experimental study of submarine sand bars. Tech. Memo. 3, U.S. Army Corps of Eng., Beach Erosion Board: 40 pp.
- King C.A.M., Williams W.W., 1949. The formation and movement of sand bars by wave action. Geogr. J. 113: 70–85.
- Komar P.D., 1976. Beach Processes and Sedimentation. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey: 430 pp.

- Komar P.D., 1998. Beach Processes and Sedimentation, 2nd Edition. Prentice Hall. 544 pp.
- Kraus N.C., Larson M., 1988. Beach profile changes measured in the tank for large waves, 1956-1957 and 1962. Tech. Rep. CERC 88-6, USACE Res. Centre, Vicksburg.
- Kriebel D.L., Dally W.R., Dean R.G., 1986. Undistorted Froude scale model for surf zone sediment transport. Proc. Int. Conf. Coast. Eng., ASCE: 1296-1310.
- Krumbein W.C. and James W.R., 1965. A log-normal size distribution model for estimating stability of beach fill material. Tech. Memo., 16, Coastal Research Centre, US Army Corps of Engineers.
- Krumbein W.C., 1957. A Method for Specification of Sand for Beach Fills. Technical Memorandum, 102, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington, DC.
- Kuang C., He L., Zhang Y., Pan Y, Shu-gang Liu S., 2010. Comparison of wave fields caused by four proposed beach nourishment schemes in Beidaihe, China. 9th International Conference on Hydrodynamics, October 11-15, 2010 Shanghai, China.
- Kuriyama Y., 2002. Medium-term behavior and associated sediment transport at Hasaki, Japan. Journal of Geophysical Research, 107 (C9): 3132-3143.
- Lamberti A. and Mancinelli A., 1996. Italian experience on submerged barriers as beach defence structures. 25th ICCE, Orlando, Florida: 2352-2365.
- Lamberti A., Petrillo A. e Ranieri M., 1985. A Comparative Analysis of Some Types of Submerged Barriers as Beach Defense Structure. Proc. 21st IAHR Cong., Melbourne, pp. 19-23.
- Larson M. and Kraus N.C., 1989. SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change. Tech. Rep. CERC,-89 (9), Coastal Eng. Res. Center.
- Larson M. and Kraus N.C., 1992. Analysis of cross-shore movement of natural longshore bars and material place to create longshore bars. Tech. Rep. DRP-92-5, CERC, 89 pp.

- Larson M., Kraus N.C., 1994. Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina. *Marine Geology* 117: 75–94.
- Li R., Liu J.-K. and Felus Y., 2001. Spatial Modeling and Analysis for Shoreline Change Detection and Coastal Erosion Monitoring. *Journal of Marine Geodesy*, 24 (1): 1-12.
- Liberatore G., 1992. Detached breakwaters and their use in Italy. Short course on design and reliability of coastal structures. Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy: 13.1–13.23.
- Lippmann T.C. and Holman R.A., 1990. The spatial and temporal variability of sandbar morphology. *Journal of Geophysical Research* 95 (C7): 11575–11590.
- Lippmann T.C., Holman R.A., Hathaway K.K., 1993. Episodic, nonstationary behavior of a double bar system at Duck, NC, U.S.A., 1986–1991 (special issue). *J. Coast. Res.*, 15: 49–75.
- Loveless, J., MacLeod, B., 1999. The influence of set-up currents on sediment movement behind detached breakwaters. *Proc. Coastal Sediments '99*. ASCE, Long Island, USA, pp. 2026–2041.
- Mancinelli A., Aminti P.L., Archetti R., Atzeni A., Canu V., Cappietti L., Lorenzoni C., Zanuttigh B., 2005. Opere di difesa realizzate con strutture sommerse a cresta bassa ad Alghero (SS), Perd'e Sali (CA), Marina di Massa (MS), Marina di Pisa (PI), Porto Recanati (MC), Marina di Montemarciano (AN), Lido di Dante (RA) e Pellestrina (VE). *Studi Costieri*, 9: 7-50.
- Manohar M, 1978. Undulated bottom profiles and onshore-offshore transport. Proceedings of 16th Conference on Coastal Engineering, Hamburg, Germany, 16.
- Mathiesen M., Goda Y., Hawkes P., Mansard E., Martin M.J., Peltier E., Thompson E, Van Vledder G., 1994. Recommended practice for extreme wave analysis. *Journal of Hydraulic Research*, 32 (6): 803-814.
- Mead S. and Black K., 1999. A Multipurpose, Artificial Reef at Mount Maunganui Beach, New Zealand. *Coastal Management*, 27 (4): 355-365.

- Mead S. and Black K., 2002. Multi-Purpose Reefs Provide Multiple Benefits – Amalgamating Coastal Protection, High-Quality Surfing Breaks and Ecological Enhancement to Maximise User Benefits and Development Opportunities. SASIC 2 - Second Surfing Arts, Science and Issues Conference. Holiday Inn, Ventura, California, USA, 9 November 2002.
- Miccoli C., 2011. Ripascimento, in località Marina Romea, con sabbie provenienti da interventi di dragaggio del porto di Ravenna. Convegno " Il monitoraggio del sistema costiero in Emilia-Romagna. Ravenna, 15 Marzo 2011.
- Miller R.L., 1976. Role of vortices in surf zone prediction: sedimentation and wave forces. In: R.A. Davis and R.L. Ethington (editors), Beach and Nearshore sedimentation. Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Oklahoma, Special publication, 24: 92-114.
- Moore L.J., 2000. Shoreline Mapping Techniques. Journal of Coastal Research, 16 (1): 111-124.
- Morton R.A., 1991. Accurate shoreline mapping: past, present, and future. Proceedings of the Coastal Sediments '91 (Seattle, Washington): 997-1010.
- Mosetti F., 1987. Distribuzione delle maree nei mari italiani. Bollettino di Oceanologia teorica e applicata, 5 (1): 65-72.
- Munari C., Corbau C., Simeoni U., Mistri M., 2011. Coastal defence through low crested breakwater structures: Jumping out of the frying pan into the fire? Marine Pollution Bulletin, 62 (8):1641-1651.
- Murden, W.R., 1995. An update on submerged berms in the coastal zone utilizing dredged material, p. 961-971. Wodcon 14, Amsterdam
- National Research Council, 1995. Beach Nourishment and Protection. Washington D.C.: National Academy Press: 334 pp.
- Niederoda A.W., Tanner W.F., 1970. Preliminary study of transverse bars. Mar. Geol., 9: 41– 62.

- Nilsson H.D., 1972. Sand bars along low energy beaches: Part 1. Multiple parallel sand bars of Southeastern Cape Cod Bay. In: Coates, D.R. (Ed.), Coastal Geomorphology. Binghamton, New York: 99– 102.
- NOURTEC, 1997. Innovative nourishment techniques evaluation, Final report. Coord. Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ, The Hague, The Netherlands, 105 pp.
- Ojeda E., B.G. Ruessink B.G. and Guillen J., 2008. Morphodynamic response of a two-barred beach to a shoreface nourishment. Coastal Engineering, 55: 1185-1196.
- Perini L., Calabrese L., 2010. Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna. Edizioni Pendragon, Bologna, pp. 240.
- Perini L., Calabrese L., Deserti M., Valentini A., Ciavola P., Armaroli C., 2011. Le mareggiate e gli impatti sulla costa in Emilia-Romagna 1946-2010. Bologna:Arpa Emilia-Romagna
- Perini L., Lorito S., 2007. Catalogo delle Opere di Difesa della Costa - Regione Emilia - Romagna.
- Pieri M. & Groppi G., 1981. Subsurface geological structure of the Po P
- Pilarczyk K.W., 2005. Coastal stabilization and alternative solutions in international perspective. Arabian Coast 2005 Key Note address:. 1-26.
- Pilarczyk K.W., Zeidler R.B., 1996. Offshore breakwaters and shore evolution control. A.A. Balkema, Rotterdam (balkema@balkema.nl).
- Piscopio R., Corsini S., Inghilesi R., Franco L., 2002. Misure strumentali di moto ondoso della rete ondometrica nazionale: analisi statistica aggiornata degli eventi estremi. 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche, Potenza 16-19 settembre 2002.
- Plant N. G., Freilich M. H. and Holman R. A., 2001. Role of morphologic feedback in surf zone sandbar response. Journal of Geophysical Research, 106: 973-989.
- Plant N.G., Holland K.T., Holman R.A., 2006. A dynamical attractor governs beach response to storms. Geophysical Research Letters, 33, L17607.

- Plant N.G., Holman R.A., Freilich M.H., Birkemeier W.A., 1999. A simple model for interannual sandbar behavior. *J. Geophys. Res.*, 104: 15755-15776.
- Pranzini E., 1999. Un indice di stabilità (Is) per la stima dell'idoneità dei materiali all'alimentazione artificiale delle spiagge. *Studi Costieri*, 1: 75-83.
- Pranzini E., 2011. Le coste difese. In: S. Ginesu (a cura di), *Le coste d'Italia*. Carlo Delfino ed., Sassari (SS): 135-146.
- Preti M., 2002. Ripascimenti di spiagge con sabbie sottomarine in Emilia-Romagna. *Studi Costieri*, 5: 107-164.
- Pruszek Z., Rozynski G., Aminti P., 1997. Statistical properties of multiple bars. *Coast. Eng.*, 31: 263–280.
- Ranasinghe R, McLoughlin R, Short A D and Symonds G, 2004. The Southern Oscillation Index, wave climate and beach rotation. *Marine Geology*, 204: 273-287.
- Ranasinghe R. and Turner, I.L., 2006. Shoreline response to submerged structures: a review. *Coastal Engineering* 53, 65-79.
- Ranasinghe R., Hacking N., Evans P. 2001. Multi-functional artificial surf breaks: A review. Report for Center for Natural Resources, NSW Dept. of Land and Water Conservation ([www.asrltd.co.nz](http://www.asrltd.co.nz)).
- Ranasinghe R., Turner I.L., Symonds G., 2006. Shoreline Response to Multi-Functional Artificial Surfing Reefs: A Numerical and Physical Modelling Study. *International Journal of Coastal Engineering*, vol 53(7): 589-611.
- Ranasinghe R., Turner, I.L., 2006. Shoreline response to submerged structures: a review. *Coastal Engineering*, 53: 65-79.
- Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998. *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia Romagna*. A cura di G. Di Dio. S.EL.CA. , Firenze, 120 p.
- Regione Emilia-Romagna (ed.), 1999. *Carta Geologica di pianura dell'Emilia-Romagna in scala 1:250.000*. Bologna

- Regione Emilia-Romagna, 1999. Note illustrative Carta Geologica d'Italia scala 1:50.000 - Foglio 223 - Ravenna. A cura di A. Amorosi, pp 144, Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato Ed., Roma.
- Reineck H.E. & Singh I.B., 1973. *Depositional Sedimentary Environments*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 439.
- Rendle E.J. and Esteves L., 2010. Developing protocols for assessing the performance of Artificial Surfing Reefs - a new breed of coastal engineering. *Littoral 2010 – Adapting to Global Change at the Coast: Leadership, Innovation, and Investment*, 2011.
- Rendle E.J. and Esteves L., 2011. Developing protocols for assessing the performance of Artificial Surfing Reefs - a new breed of coastal engineering. *Littoral 2010 – Adapting to Global Change at the Coast: Leadership, Innovation, and Investment 2011*.
- Ricci Lucchi F., 1990. *Evoluzione Geologica della Pianura*. Da: *Il mondo della natura in Emilia Romagna – La pianura e la costa*. Federazione delle Casse di Risparmio e delle Banche del Monte dell'Emilia Romagna; EDS Bologna: 9-18.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi, G, Iaccarino S., Papani G., Raffi I & Rio D., 1982. *Evoluzione sedimentaria epaleogeografica del margine appenninico*. In: Cremonini G. and Ricci Lucchi F. (Editors) *Guida alla geologia del margine appenninico-padano*. Guide Geologiche Regionali Soc. Geol. Ital.: 17-46.
- Rodella I., Simeoni U., Corbau C., Utizi K., 2012. *Dredged Sediment Reuse Plan In Ravenna Territory (Emilia-Romagna, Italy)*. *Atti del Convegno Sedi.Port.Sil Costanta (Romania), 09-10 Maggio 2012*: 11 pp. (in press).
- Roelvink J.A., 1993. *Surf beat and its effect on cross-shore profiles*. PhD thesis, Technical University of Delft: 150 pp.
- Roncuzzi A., 1993. *Delta del Po e formazione della costa romagnola*. Distribuzione attuale degli ambienti naturali. WWF-Ravenna.
- Ruessink B.G., 1998. *Infragravity waves in a dissipative multiple bar system*. PhD thesis, Utrecht University, 254 pp.

- Ruessink B.G., Kroon A., 1994. The behaviour of a multiple bar system in the nearshore zone of Terschelling, the Netherlands: 1965– 1993. *Mar. Geol.* 121: 187–197.
- Ruessink B.G., Kuriyama Y., Reniers A.J.H.M., Roelvink J.A., Walstra D.J.R., 2007. Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks. *Journal of Geophysical Research*, 112, F03010.
- Ruessink B.G., Van Enckevort I.M.M., Kingston K.S., Davidson M.A., 2000. Analysis of observed two and three-dimensional nearshore bar behavior. *Marine Geology*, 169: 161–183.
- Sallenger A.H., Holman R.A., Birkemeier W.A., 1985. Storm-induced response of a nearshore-bar system. *Mar. Geol.*, 64: 237– 257.
- Sallenger A.H., Howd P.A., 1989. Nearshore bars and the breakpoint hypothesis. *Coast. Eng.* 12: 301–313.
- Schwartz, M.L., 2005: *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer, Netherlands.
- Selli R., Ciabatti M., 1977. L' abbassamento del suolo della zona litoranea ravennate. *Giornale di Geologia* (2), XLII, fasc. 1: 1-47.
- Sestini G., 1992. Implications of climatic changes for the Po delta and Venice lagoon. In L. Jeftic, J. Milliman and G. Sestini (eds.). *Climatic Change and the Mediterranean*. Edward Arnold, London.
- Shand R., D., Beiley, D., B. & Shepherd, J., M., 1999. An inter-site comparison of net offshore bar migration characteristics and environmental conditions. *Journal of Coastal Research*, 15: 750-765.
- Shepard F.P., 1950. Longshore bars and longshore troughs. U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Technical Memo, 15.
- Short A.D. and Aagaard T., 1993. Single and multi-bar beach change models. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 15: 141-157.
- Short A.D., 1975. Multiple offshore bars and standing waves. *J. Geophys. Res.*, 80: 3838-3840.
- Short A.D., 1975. Offshore bars along the Alaskan Arctic coast. *J. Geol.*, 83: 209– 221.

- Short A.D., 1979. Three dimensional beach-stage model. *Journal of Geology*, 87: 553-571.
- Short A.D., 1992. Beach systems of the central Netherlands coast: processes, morphology and structural impacts in a storm driven multi-bar system. *Marine Geology* 107, 103–137.
- Short A.D., Aagaard T., 1993. Single and multi-bar beach change models (special issue). *J. Coast. Res.*, 15: 141–157.
- Short A.D., Hesp P.A., 1982. Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia. *Mar. Geol.*, 48:259-284.
- Short AD, (ed), 1999. *Beach and Shoreface Morphodynamics*. John Wiley and Sons, Chichester, 379 pp.
- Silva P, De Girolamo P., 1993. Interventi di ripascimento artificiale sul litorale di Pellestrina (VE). In Aminti e Pranzini Ed. *La difesa dei litorali in Italia*, edizioni delle Autonomie, Roma: 269-282.
- Simeoni U., 1989. Rapporti tra barre e caratteri idrodinamico-geomorfologici nei litorali nord abruzzesi (medio Adriatico). *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 108: 161-173.
- Simeoni U., 2003. Rifluimento della spiaggia e costruzione di dune armate nell'area di foce del Po di Goro. *Accademia dei Lincei, Atti della XXI giornata dell'ambiente - aree costiere*, 205: 157-164.
- Simeoni U., Bonora N., Corbau C., Gragnaniello S., Schiavi C., Tessari U., Zamariolo A., 2004. Il litorale tra Porto Garibaldi ed il Lido di Volano. *Rapporto Tecnico*, Regione Emilia-Romagna, Ottobre 2004: pp. 296.
- Simeoni U., Gragnaniello S., Bonora N, Farina M., Peretti A., Sarti G., Schiavi C., Valpreda E., 2003. Effects of anthropization of the Ferrara Littoral and intervention of re-equilibrium. In: Ozhan E. (Ed), *Proceedings of the Sixth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment*, 7-11 October 2003, Ravenna, Italy, 1-3: 1605-1616.

- Simeoni U., Utizi K., Corbau C., Rodella I., Mezzogori D., Tessari U., Soldati M., Pedone C., 2011. *Studio del tratto di costa nord di Punta Marina per valutare l'efficacia delle soluzioni difensive sperimentali adottate per la riduzione dei fenomeni erosivi in atto*. Rapporto Tecnico, Comune di Ravenna, Dicembre 2011: pp. 311.
- Simioni B., Esteves L.S., 2010. Analysing the performance of multi-functional artificial reefs. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 10, 127-145.
- Smith E.R. e Kraus N.C., 1992. Laboratory Study of Wave Transformation on Barred Beach Profiles. *Proc. 23rd Int. Conf. Coast. Eng., Venezia, ASCE*, 1: 630-643.
- Smith J.T., Harris L.E. and Tabar J., 1998. Preliminary evaluation of the Vero Beach (FL) prefabricated submerged breakwater. *Beach Preservation Technology '98, FSBPA, Tallahassee, FL*.
- Smith S. D. and Co-authors, 1992. Sea surface wind stress and drag coefficients: The HEXOS results. *Boundary Layer Meteorol.*, 60: 109–142.
- Spanhoff E.J., Biegel J., Van de Graaff J., Hoekstra P., 1997. *Shoreface nourishment at Terschelling, The Netherlands: feeder berm or breaker berm?* Coastal Dynamics '97, ASCE, Plymouth, England: 863-872.
- Stive M.J.F., 1986. A model for cross-shore sediment transport. *Proceedings of the 20th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, New York: 1550 – 1564.
- Sunamura T., 1988. Beach morphologies and their change. In: *Nearshore Dynamics and Coastal Processes: Theory, Measurement, and Predictive Models*. University of Tokyo Press, Tokyo: 136-152.
- Sunamura, T., Takeda, I., 1984. Landward migration of inner bars. *Mar. Geol.* 60, 63–78.
- Thieler E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi J.L., Miller T.L., 2005. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304.

- Thornton E.B., Humiston R.T., Birkemeier W., 1996. Bar/trough generation on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 101: 12097–12110.
- Tomasicchio U., Tomasicchio G.R., 2010. *Manuale di Ingegneria Portuale e Costiera. Nuova*
- Tomasicchio, U., 1996. Submerged breakwaters for the defence of the shoreline at Ostia: field experiences, comparison. *Proc. 25th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, Orlando, USA: 2404– 2417.
- Turner I.L., Leyden V.M., Cox R.J., Jackson L.A., McGrath J., 2001. Physical model study of the gold coast artificial reef. *Journal of Coastal Research, Special Issue 29 (Natural and Artificial Reefs for Surfing and Coastal Protection)*: 131–146.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1984. *Shore Protection Manual*. 4th ed., U.S. Army Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1995. *Design of Beach Fills*. USACE Engineering Manual, 1110-2-3301, 86 pp.
- Utizi K., Simeoni U., Corbau C., Soldati M., Nannini S., 2012. *Primi risultato sulla costruzione di una barra e sulla messa in opera di un reef artificiale a difesa dell'arenile di Punta Marina (RA)*. Atti del Quarto Simposio Internazionale "Il Monitoraggio Costiero Mediterraneo: problematiche e tecniche di misura. CNR-IBIMET, 12-13-14 Giugno 2012, Livorno (LI) (in press).
- Vai G.B., 1988. A field trip guide to the Romagna Apennine geology: The Lamone valley. In De Giuli C. & Vai G.B. (eds): *Fossil vertebrates in the Lamone valley Romagna Apennines*, Faenza: 7-37.
- Valentini A., Deserti M., Ciavola P., Armaroli C., Masina M., Perini L., Calabrese L., 2009. I nuovi studi su mareggiate e fenomeni erosivi. *ARPA RIVISTA*, 6: 16-18.
- Van Duin M.J.P, Wiersma N.R., Walstra D.J.R., van Rijn L.C Stive M.J.F., 2004. Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands. *Coastal Engineering*, 51: 813-837.

- Van Enckevort I.M.J. and Ruessink B.G., 2003. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 1: alongshore uniform variability. *Continental Shelf Research*, 23: 501–512.
- Van Rijn L.C. & Walstra D.J.R., 2004. Analysis and modeling shoreface nourishments. Technical Report, WL - Delft Hydraulics.
- Vega De Seoane C., Gallego Fernandez J.B. & Vidal C.P., 2007. Manual de Restauración de Dunas Costeras. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas. Gobierno de España. Artes Gráficas Quinzaños, S. L.
- Vincent C.L., 1984. Deepwater wind wave growth with fetch and duration. Miscellaneous Paper CERC-84-13, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Voorde M.T., Antunes do Carmo J.S., Neves M.G., 2006. Contribution to the design of artificial surfing reef breakwaters for coastal protection. In: Matos J., Chanson H. (Eds.), *Hydraulic Structures: a Challenge to Engineers and Researchers*, The University of Queensland, Brisbane, Australia: 115-124.
- Walstra D.J.R., van Ormondt M. and Roelvink J.A., 2004. Shoreface Nourishment Scenarios. Detailed morphodynamic simulations with Delft3D for various shoreface nourishment designs. Technical Report, , WL - Delft Hydraulics.
- Wijnberg K.M. and Kroon A., 2002. Barred beaches. *Geomorphology*, 48: 103–120.
- Wijnberg K.M., 1995. Morphologic behaviour of a barred coast over a period of decades. PhD thesis Utrecht University, Netherlands Geographical Studies 195, KNAG, The Netherlands, 245 pp.
- Wijnberg K.M., 1997. On the systematic offshore decay of breaker bars. In: Edge, B.L. (Ed.), *Coastal Engineering 1996, Proceedings of the 25th International Conference*. ASCE, New York, pp. 3600– 3613.
- Wijnberg K.M., Terwindt J.H.J., 1995. Quantification of decadal morphological behaviour of the central Dutch coast. *Mar. Geol.*, 126: 301– 330.

- Work P.A. and Dean R.G., 1995. Assessment and prediction of beach-nourishment evolution. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 121 (3): 182-189.
- Work P.A. and Otay E.N., 1996. Influence of nearshore berm on beach nourishment, 25th ICCE, Orlando, USA: 3722-3735.
- Wright L.D. and Short A.D., 1983. Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia. In: Komar P.D. (Ed.), *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. CRC press, Boca Raton, USA: 35-64.
- Wright L.D. and Short A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56: 93-118.
- Wright L.D., Chappell J., Thom B.G., Bradshaw M.P. and Cowell P., 1979. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore system: Southern Australia. *Marine Geology*, 32: 105-140.
- Zanuttigh B., Van der Meer J.W., 2006. Wave reflection from Coastal Structures. ASCE, Proc. of 30th International Conference on Coastal Engineering, San Diego, California, USA.

## 12 Sitografia

---

<http://www.arpa.emr.it/sim/?mare/boa>

[http://www.arpa.emr.it/sim/?osservazioni\\_e\\_dati/dexter](http://www.arpa.emr.it/sim/?osservazioni_e_dati/dexter)

<http://www.emiliaromagnaturismo.it/>

<http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/index.html>

<http://www.micore.eu>

[http://www.regione.emilia-](http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/sito_cartografia.htm)

[romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito cartografia/sito cartografia.htm](http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/sito_cartografia.htm)

<http://www.telemisura.it>



## Appendice A. Carte batimetriche

---

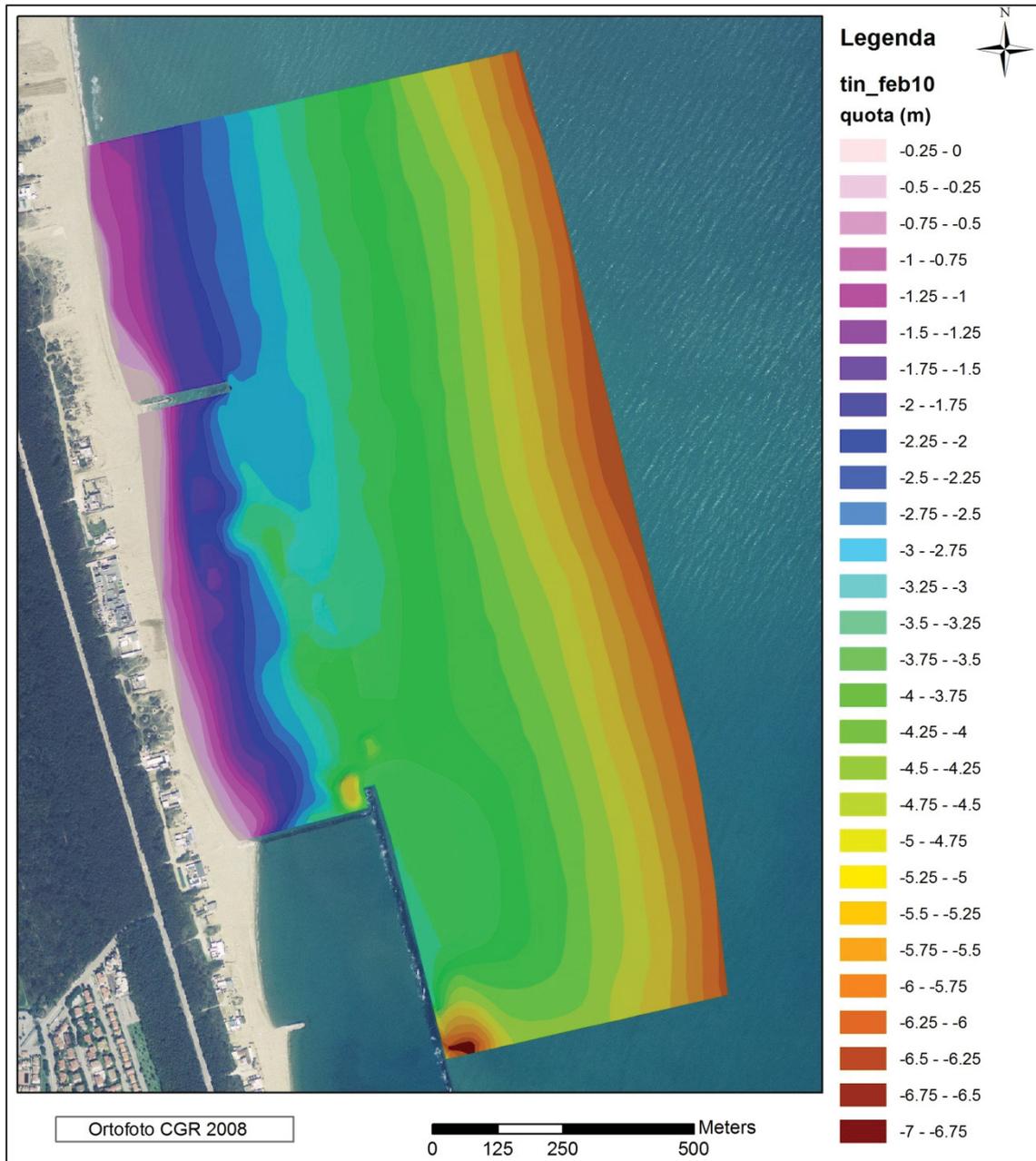
Di seguito sono riportate le carte batimetriche dei singoli rilievi batimetrici effettuati con ecoscandaglio *single-beam* nell'area in esame:

- Febbraio 2010 (pre-intervento),
- Maggio 2010 (post-intervento),
- Dicembre 2010,
- Marzo 2011,
- Maggio 2011,
- Settembre 2011,
- Gennaio 2012,
- Marzo 2012,
- Giugno 2012,
- Ottobre 2012.

Si riportano inoltre le carte batimetriche dei rilievi batimetrici effettuati con ecoscandaglio *multi-beam* nell'area in cui è ubicato il *Tecnoreef*:

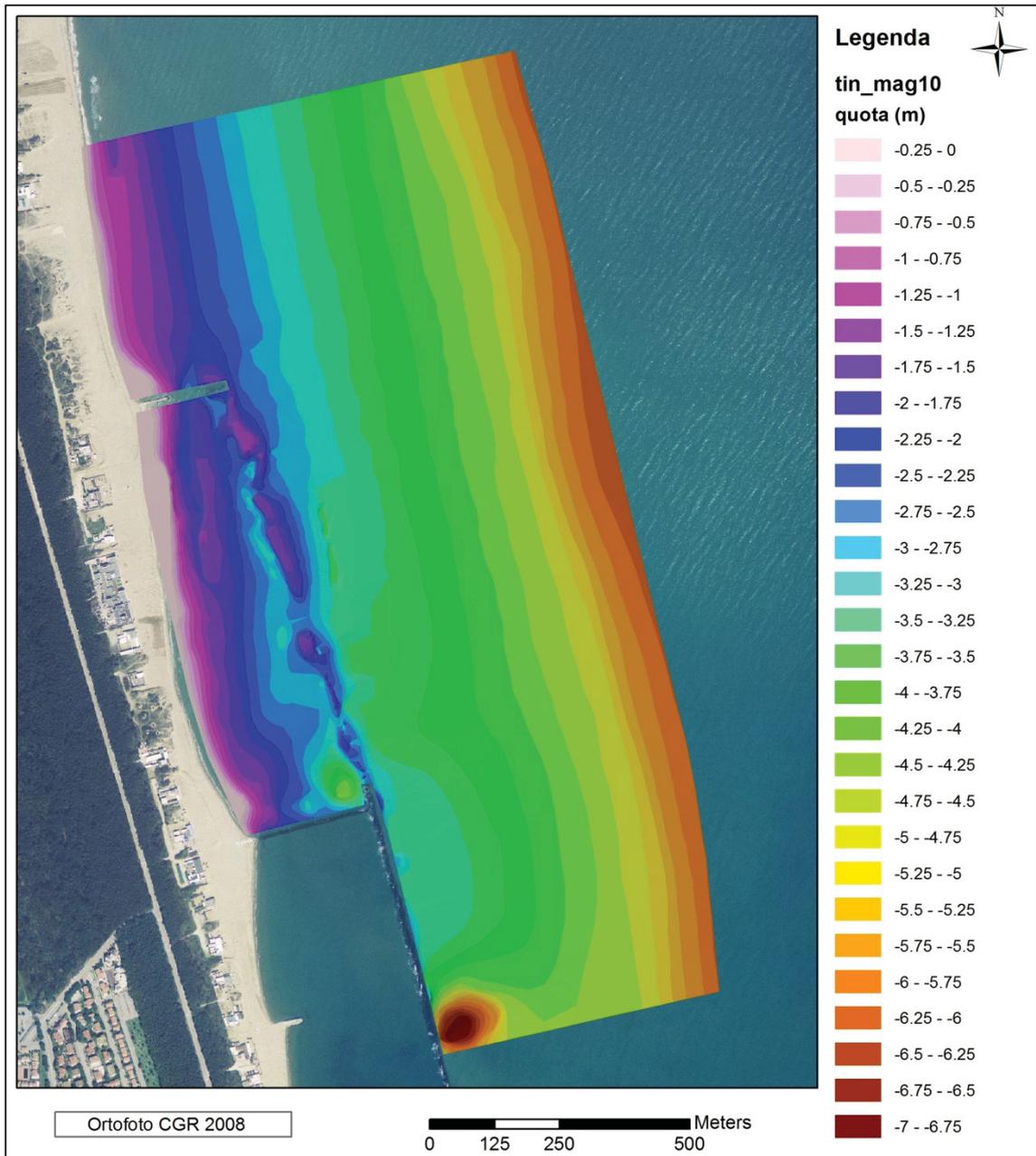
- Maggio 2011,
- Giugno 2012.

Rilievo Febbraio 2010



A.1- Mappa batimetrica di Febbraio 2010.

Rilievo Maggio 2010



A.2- Mappa batimetrica di Maggio 2010.

Dicembre 2010

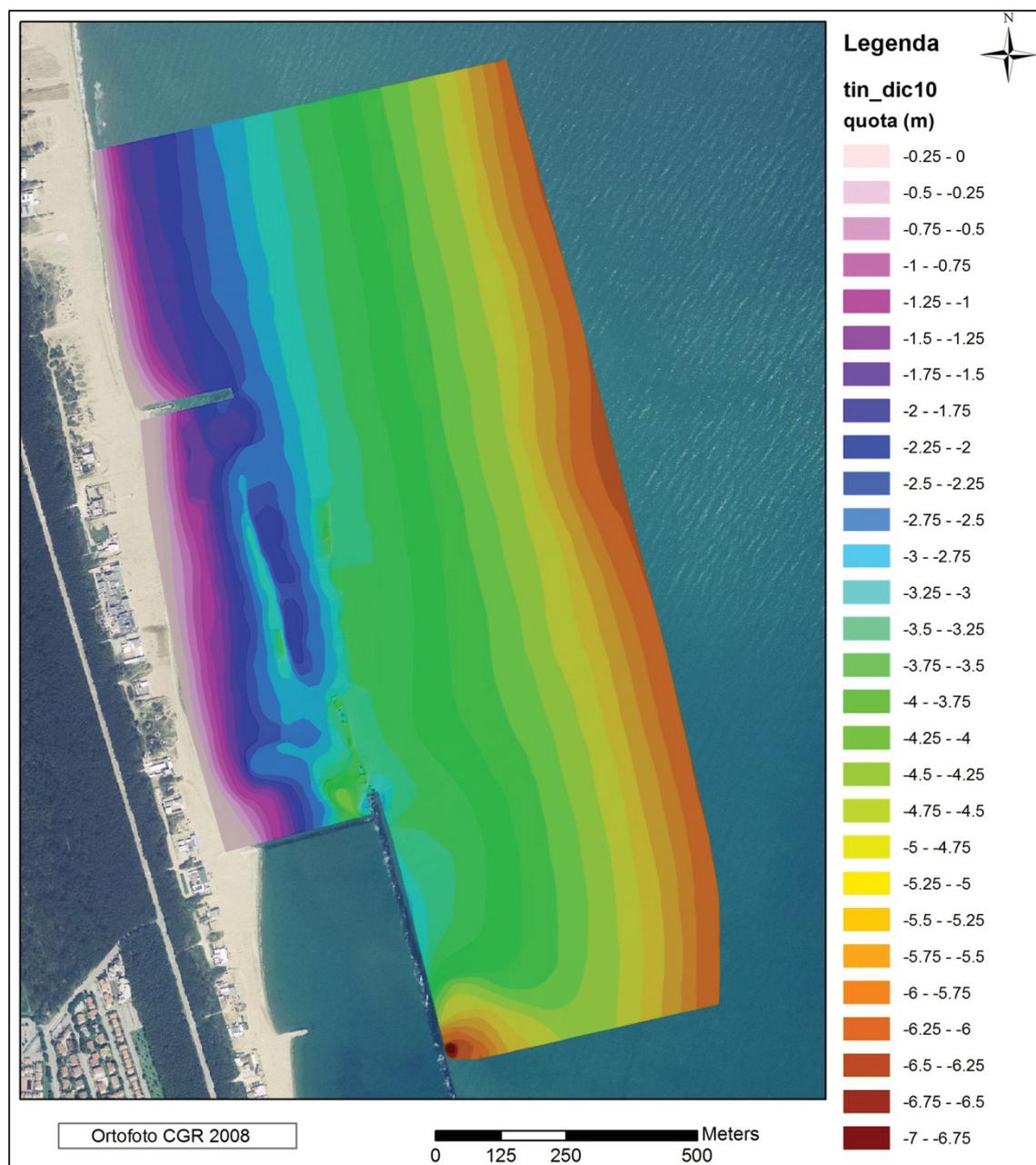


Fig. A.3 - Mappa batimetrica di Dicembre 2010.

Rilievo Marzo 2011

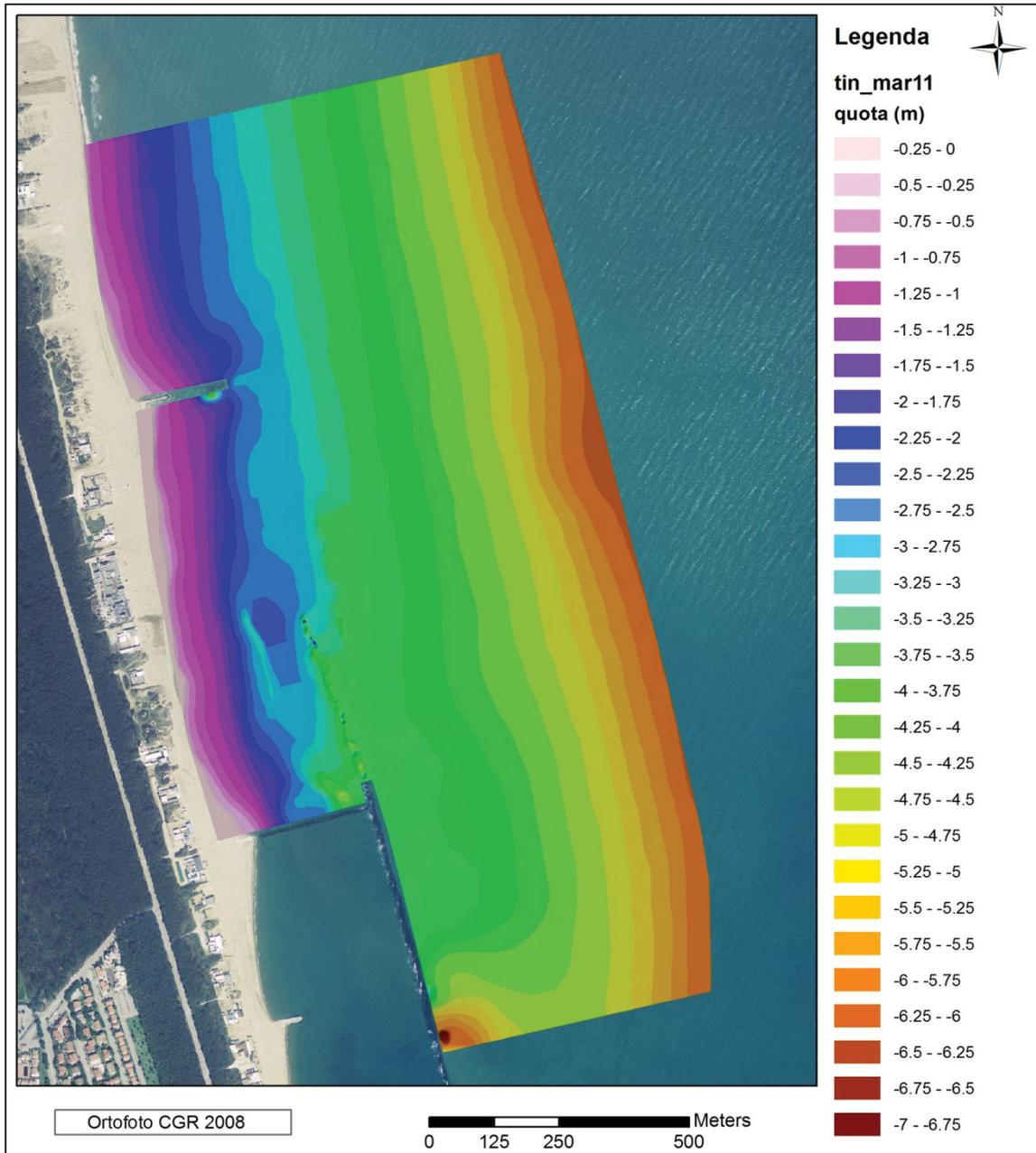


Fig. A.4 - Mappa batimetrica di Marzo 2011.

Rilievo Maggio 2011

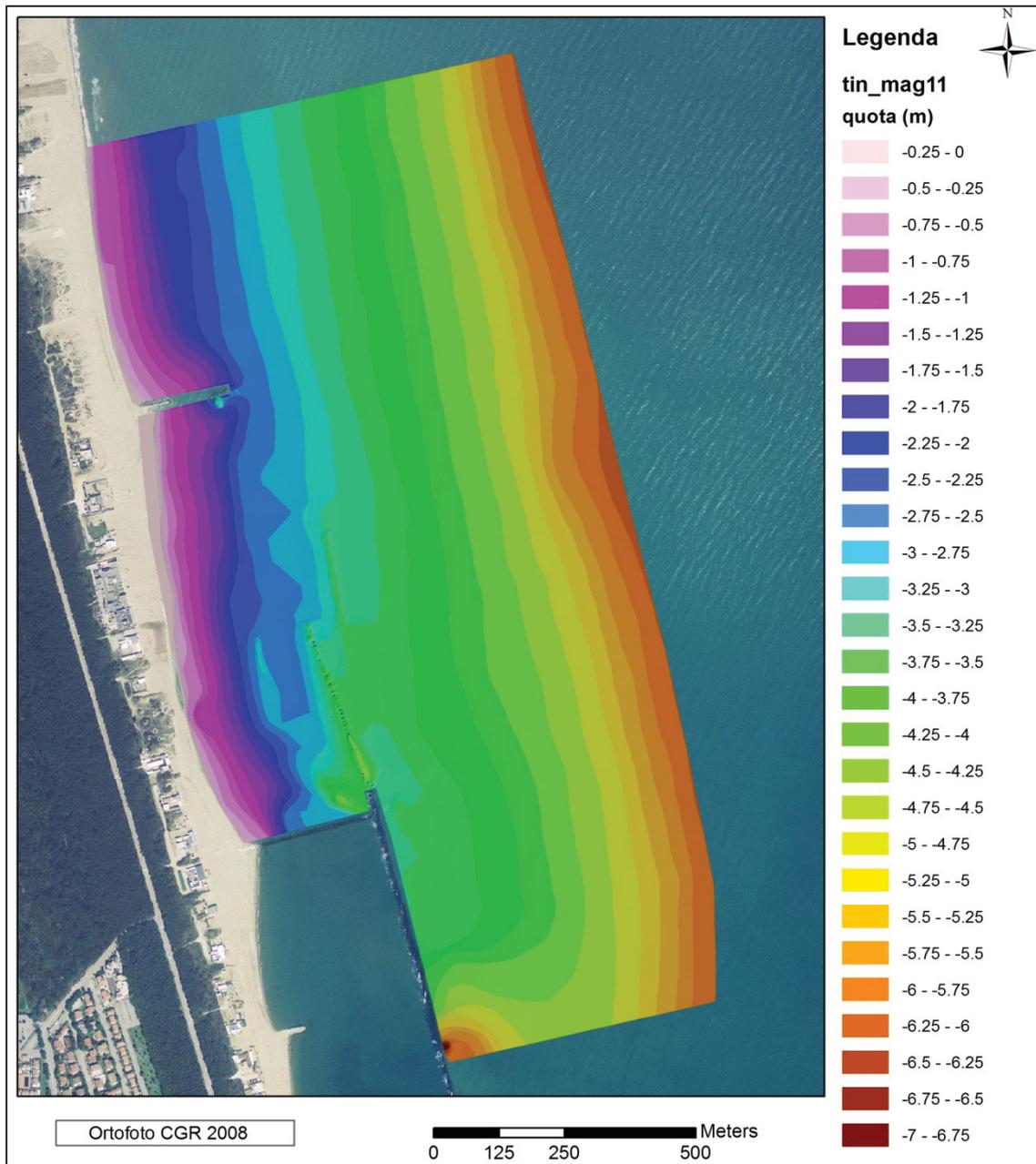


Fig. A.5 - Mappa batimetrica di Maggio 2011.

Rilievo Settembre 2011

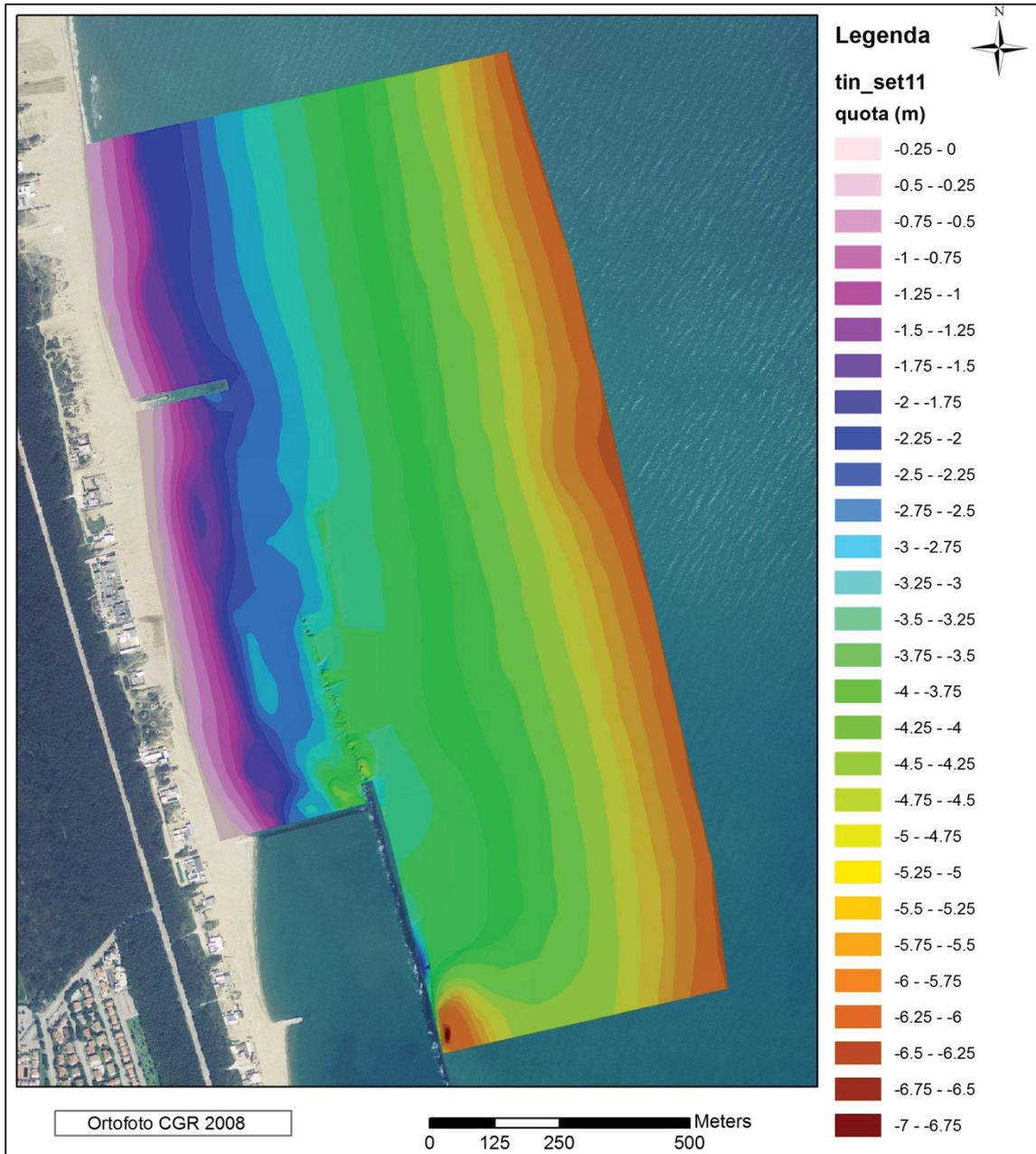


Fig. A.6 - Mappa batimetrica di Settembre 2011.

Rilievo Gennaio 2012

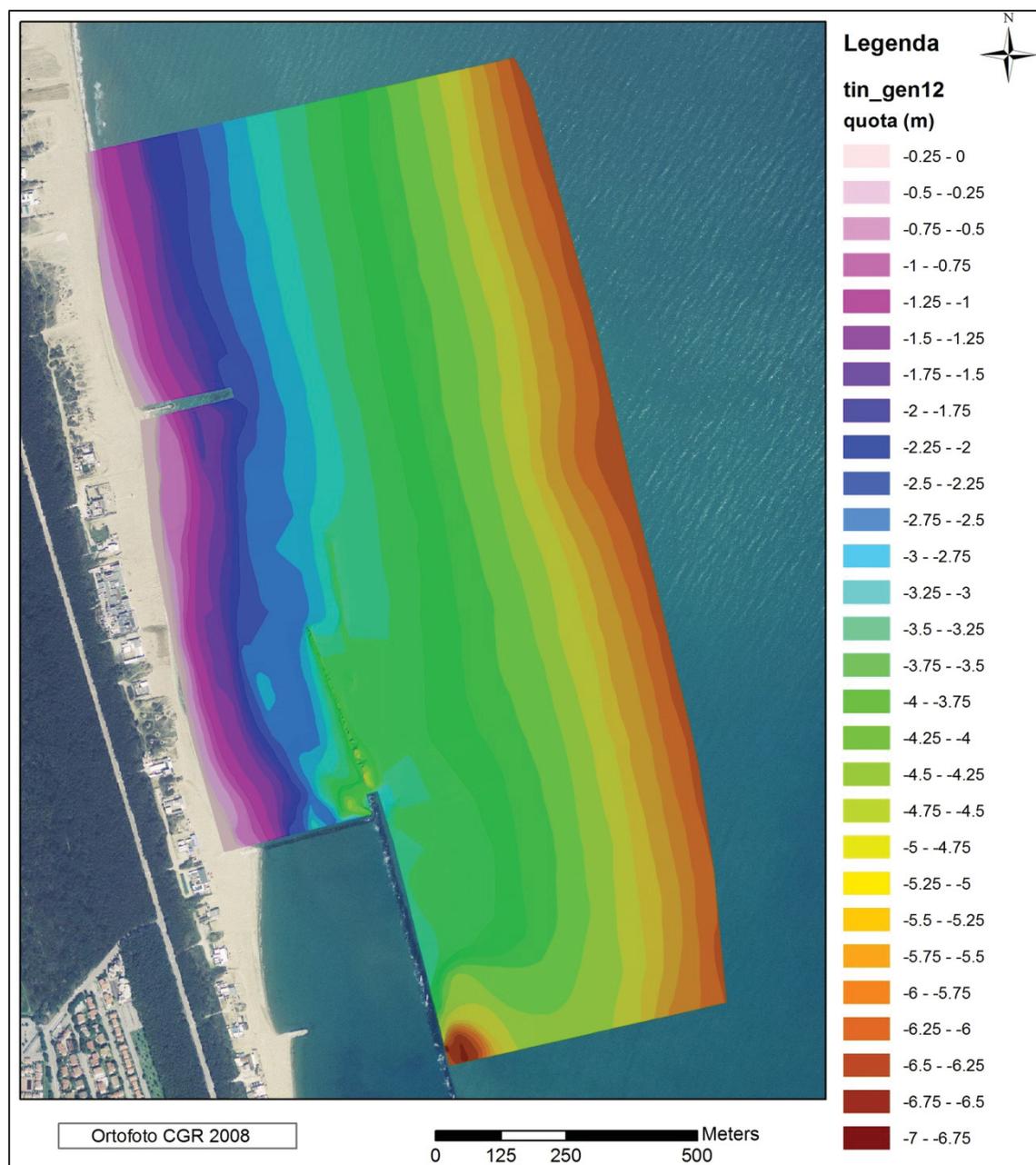


Fig. A.7 - Mappa batimetrica di Gennaio 2012.

Rilievo Marzo 2012

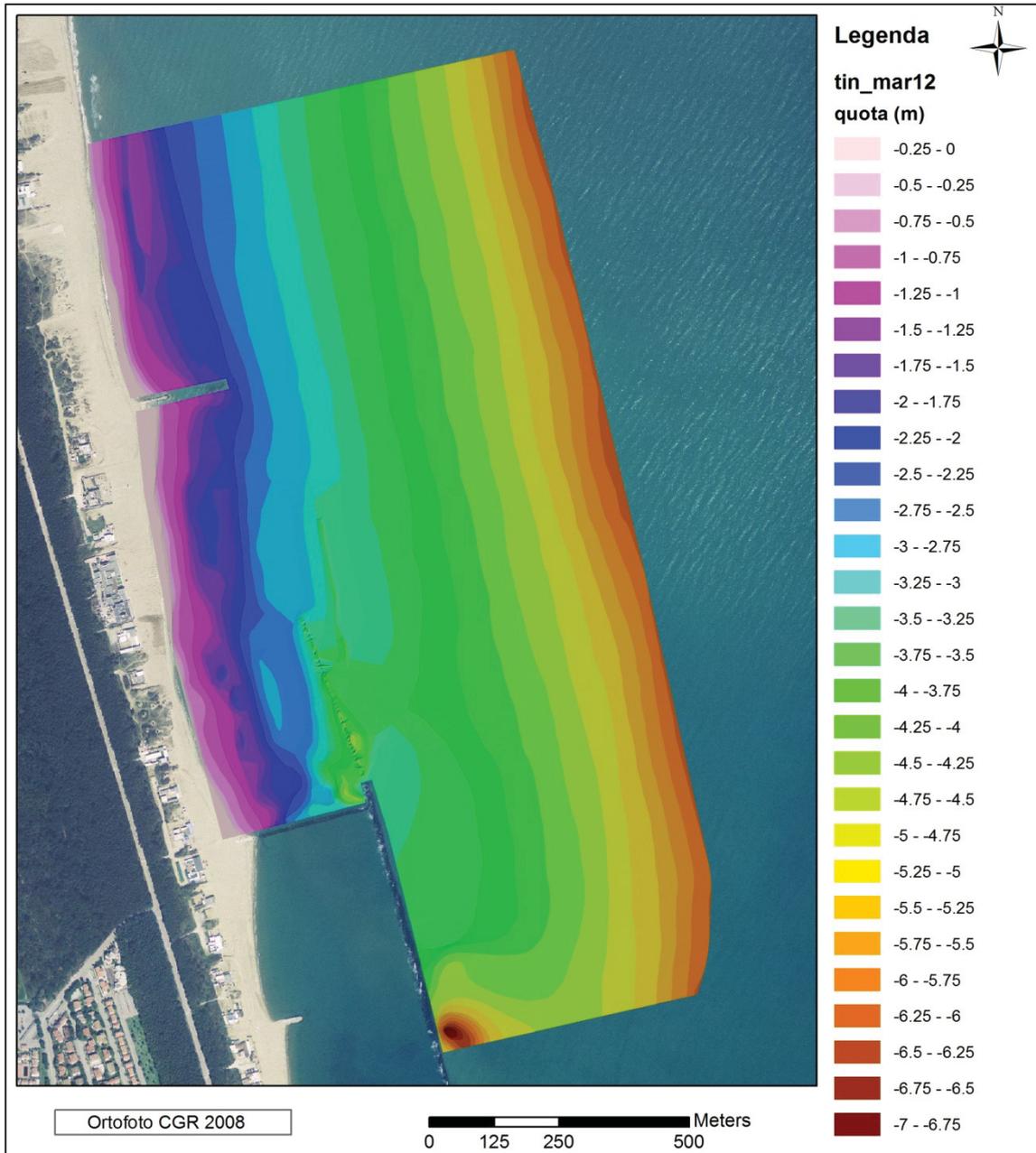


Fig. A.8 - Mappa batimetrica di Marzo 2012.

Rilievo Giugno 2012

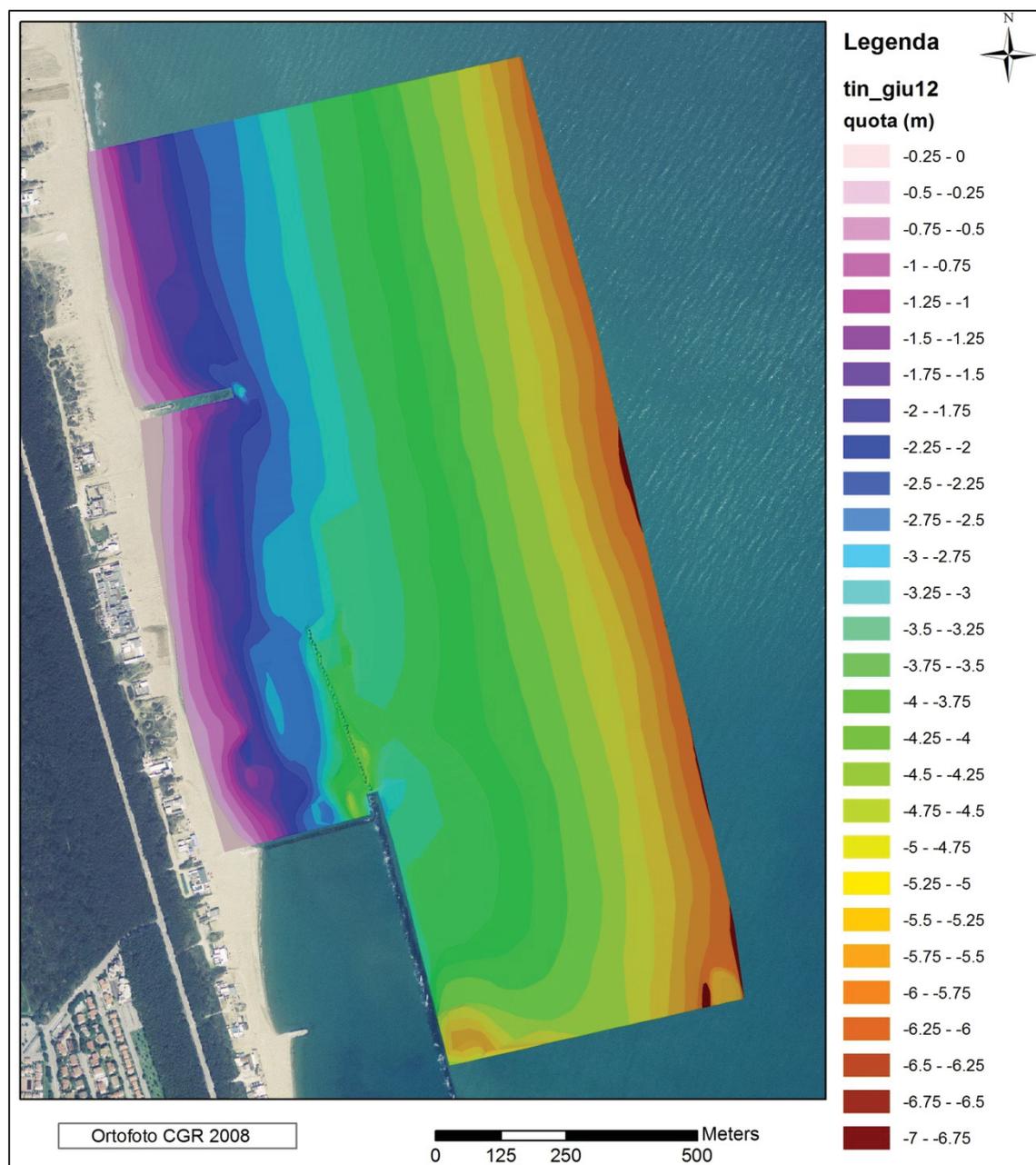


Fig. A.9 - Mappa batimetrica di Giugno 2012.

Rilievo Ottobre 2012

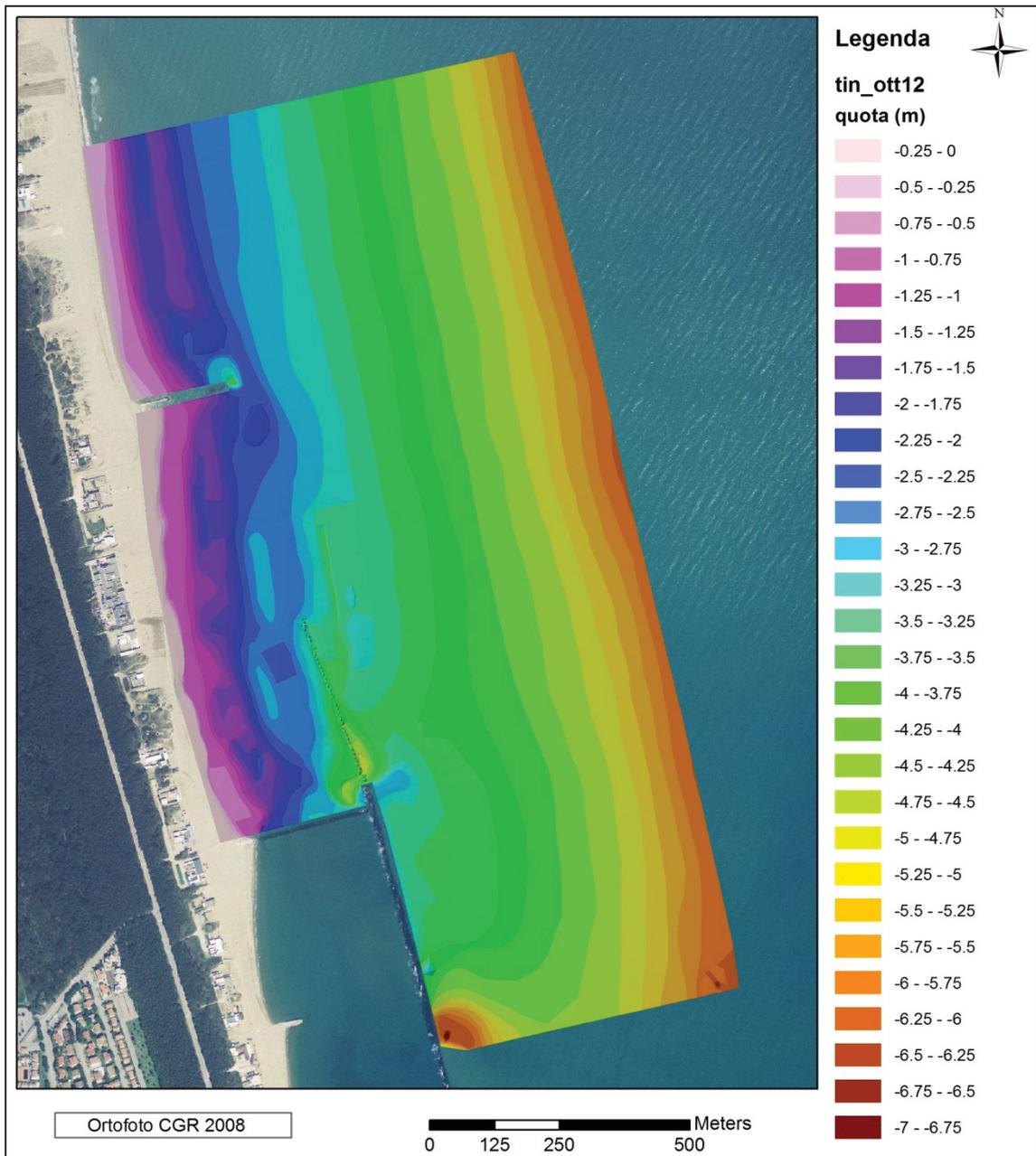


Fig. A.10 - Mappa batimetrica di Ottobre 2012.

Rilievo Maggio 2011

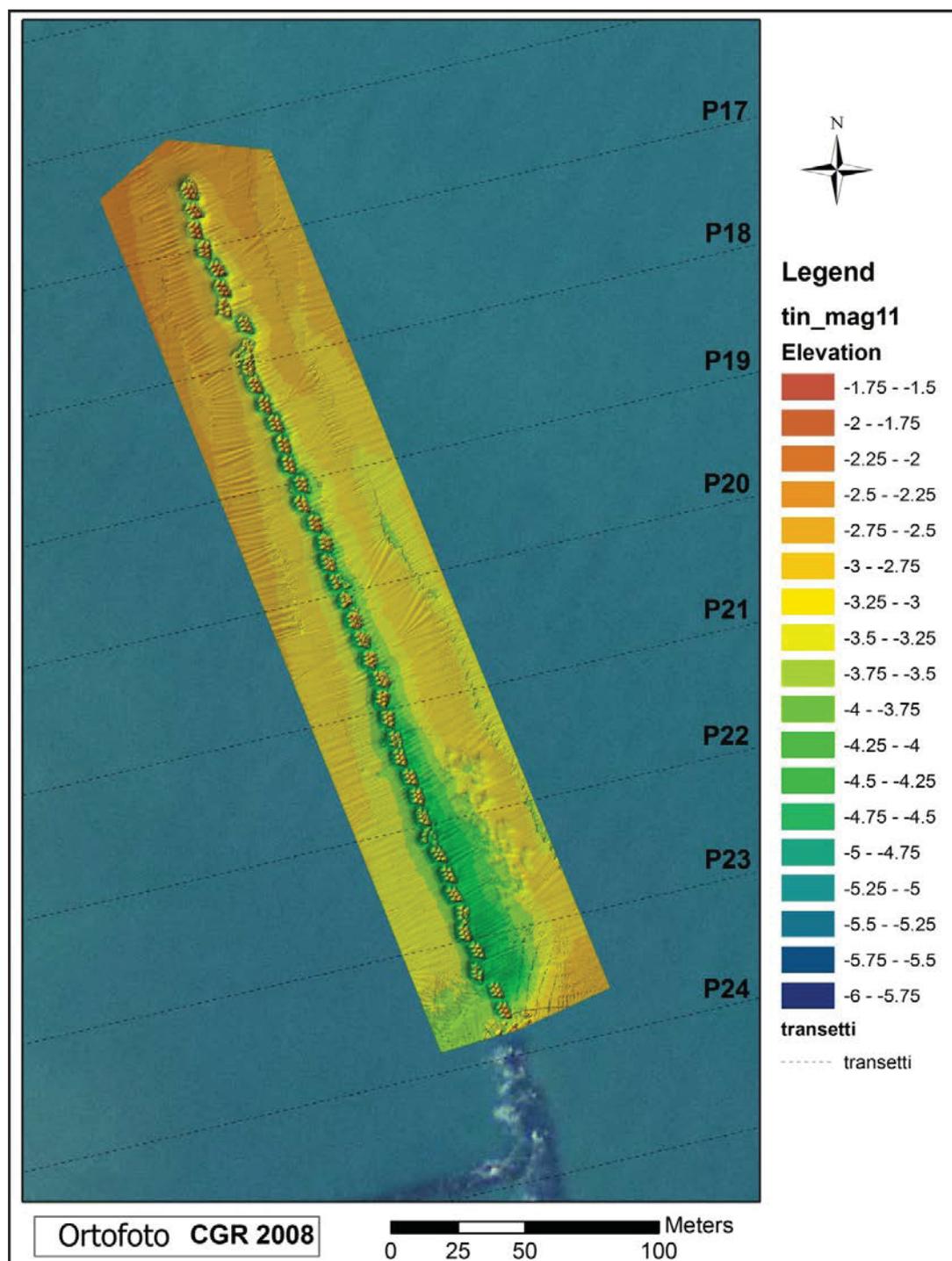


Fig. A.11 - Mappa batimetrica da rilievo multibeam della zona in cui è stato posizionato il *Tecnoreef* (Maggio 2011).

Rilievo Giugno 2012

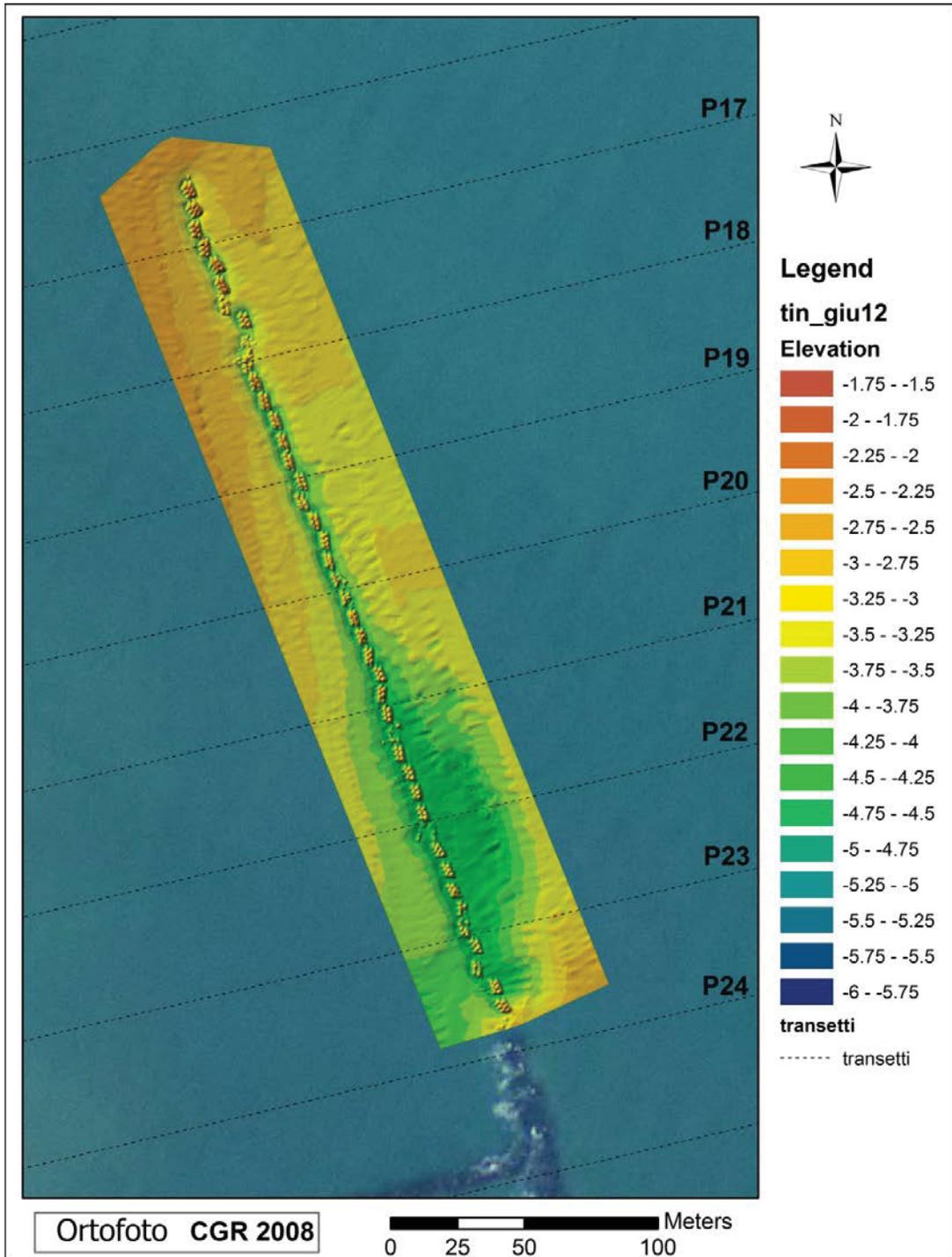
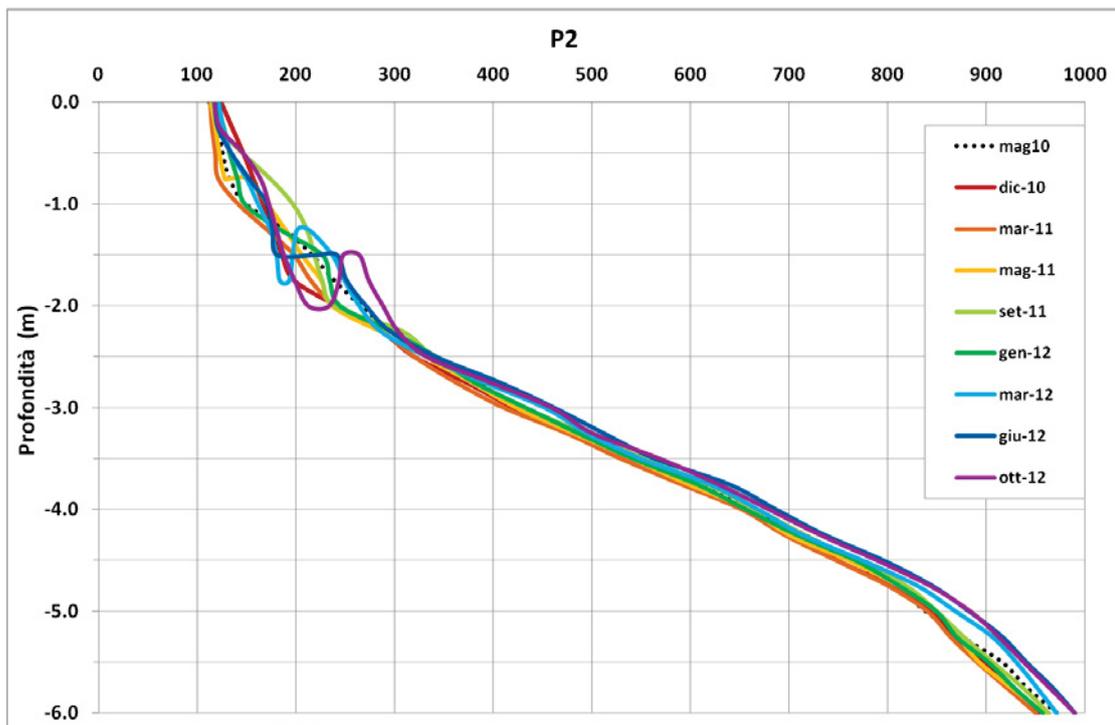
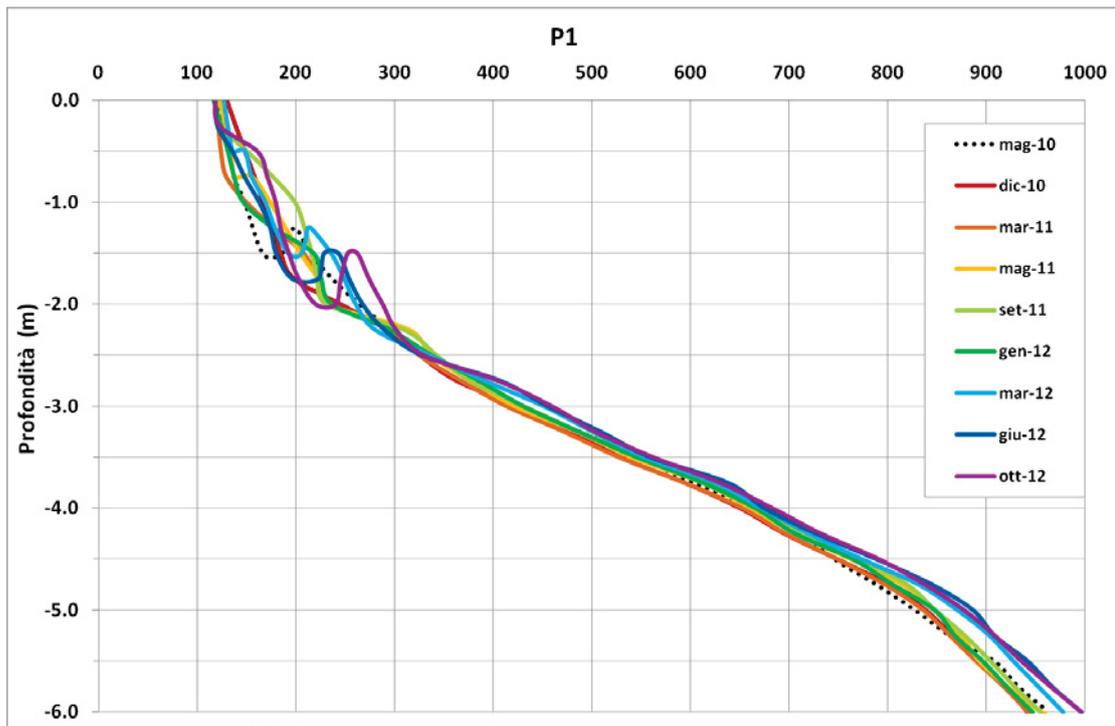


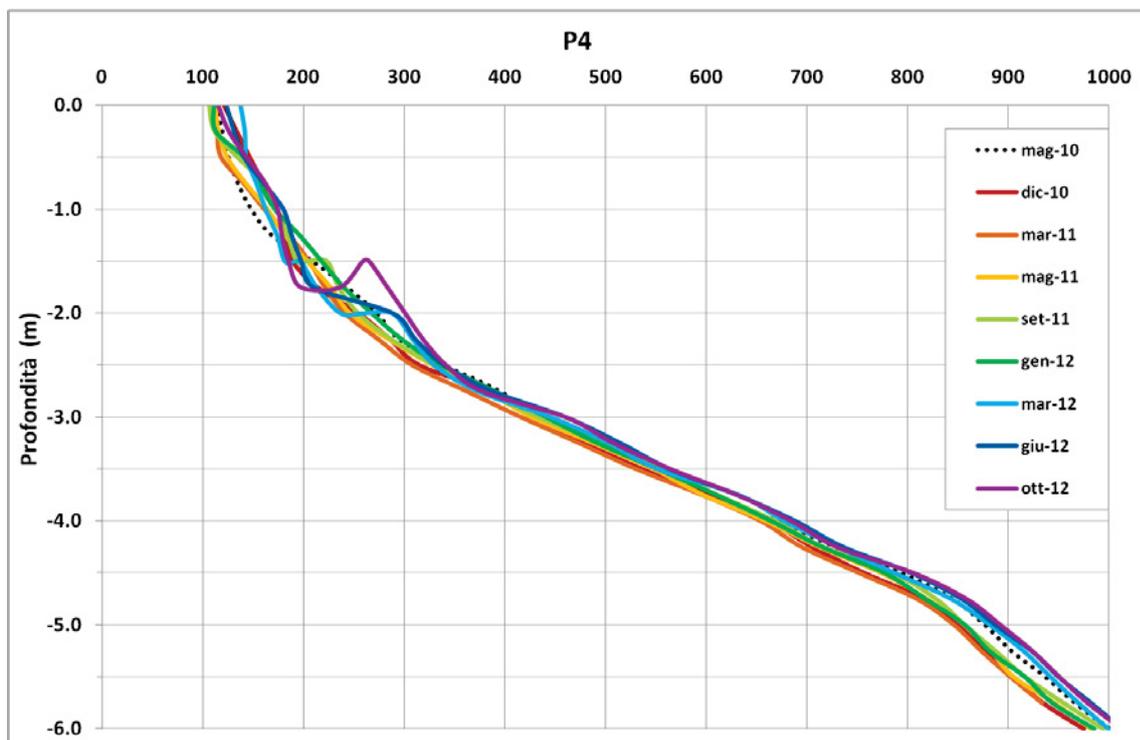
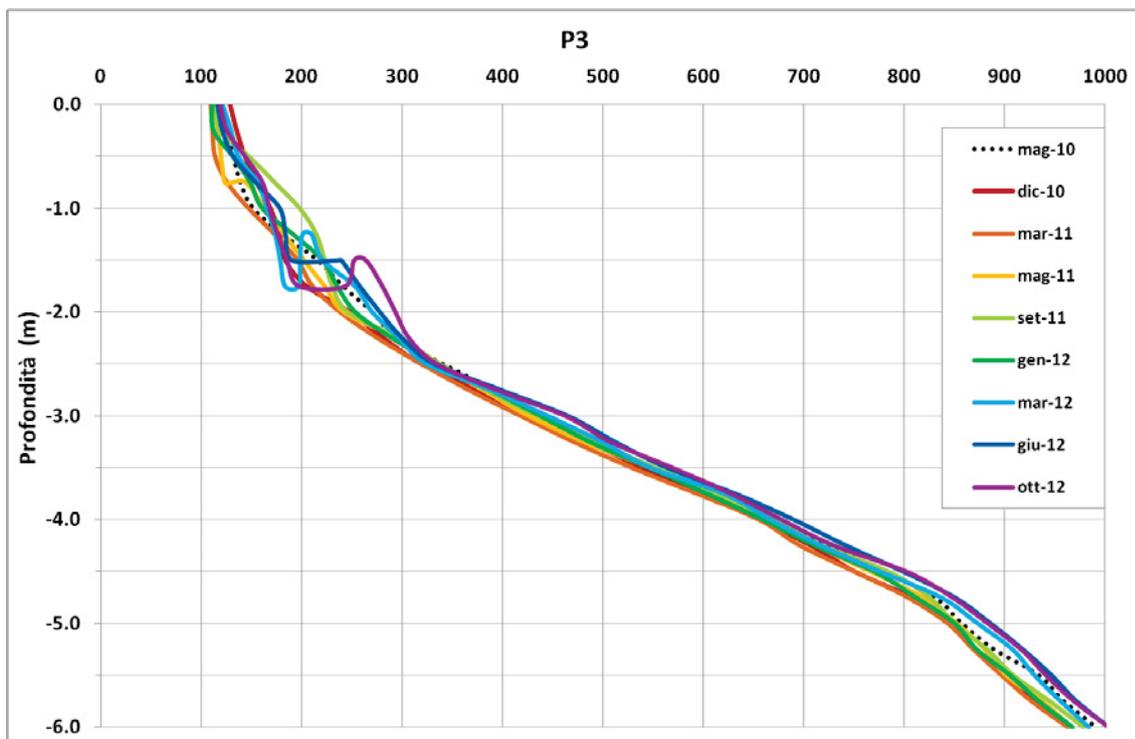
Fig. A.12 - Mappa batimetrica da rilievo multibeam della zona in cui è stato posizionato il *Tecnoreef* (Giugno 2012).

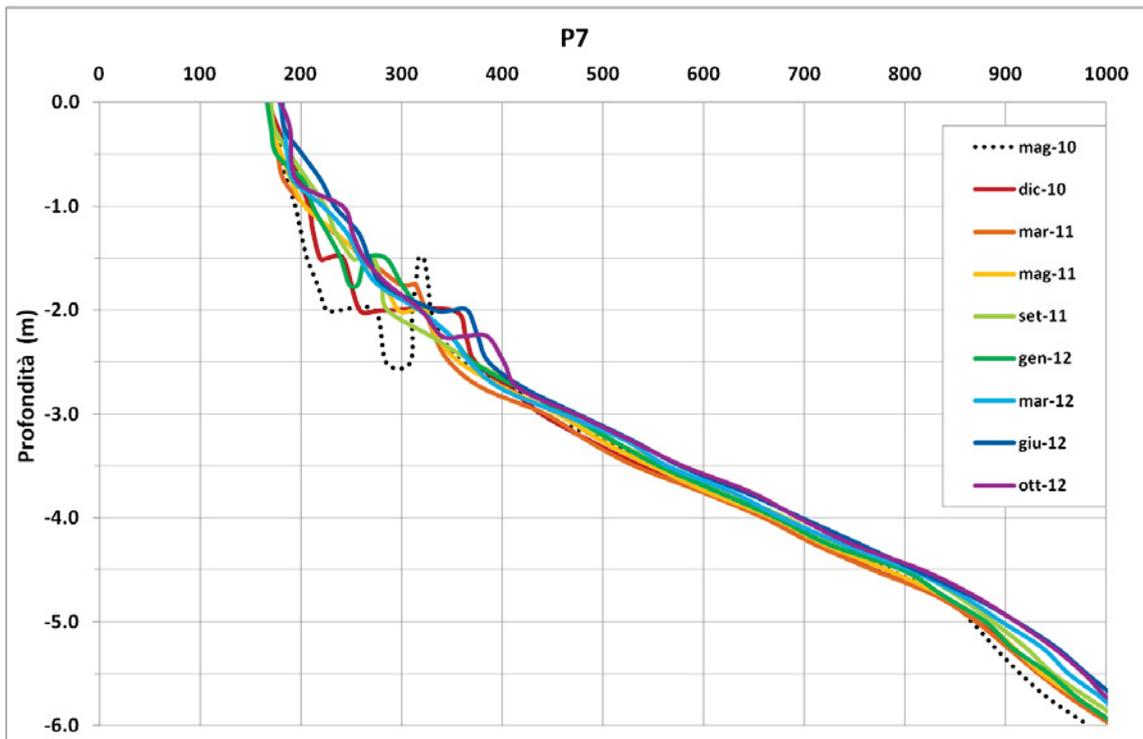
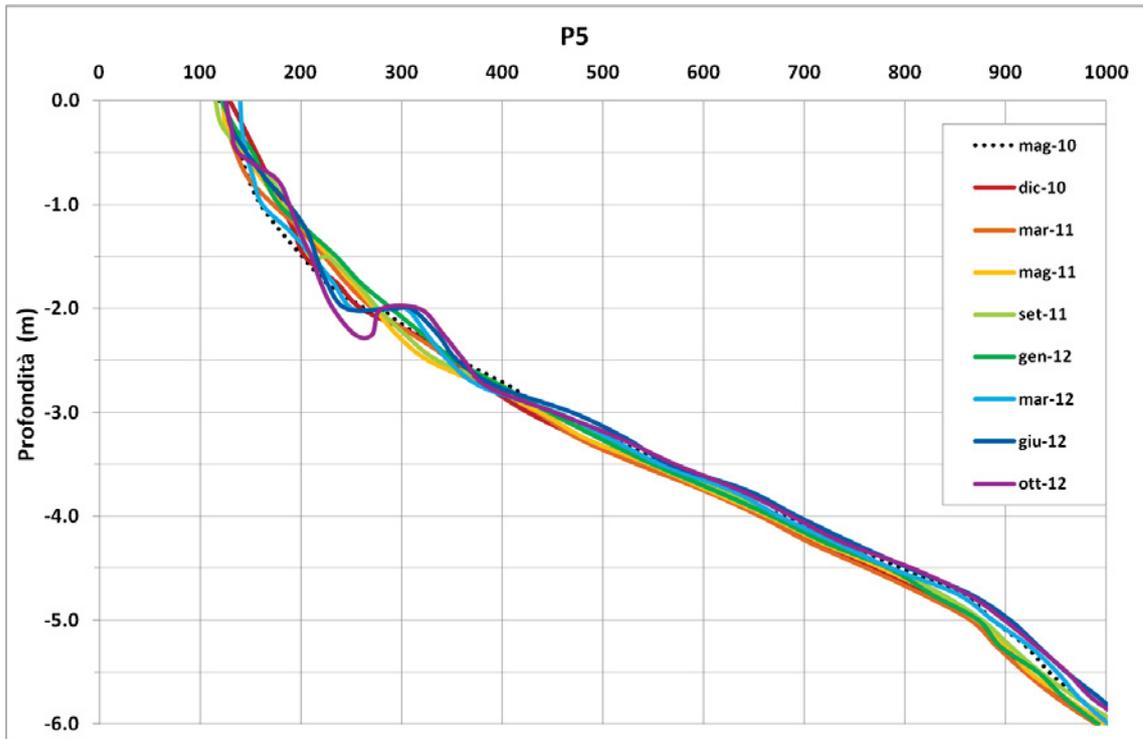


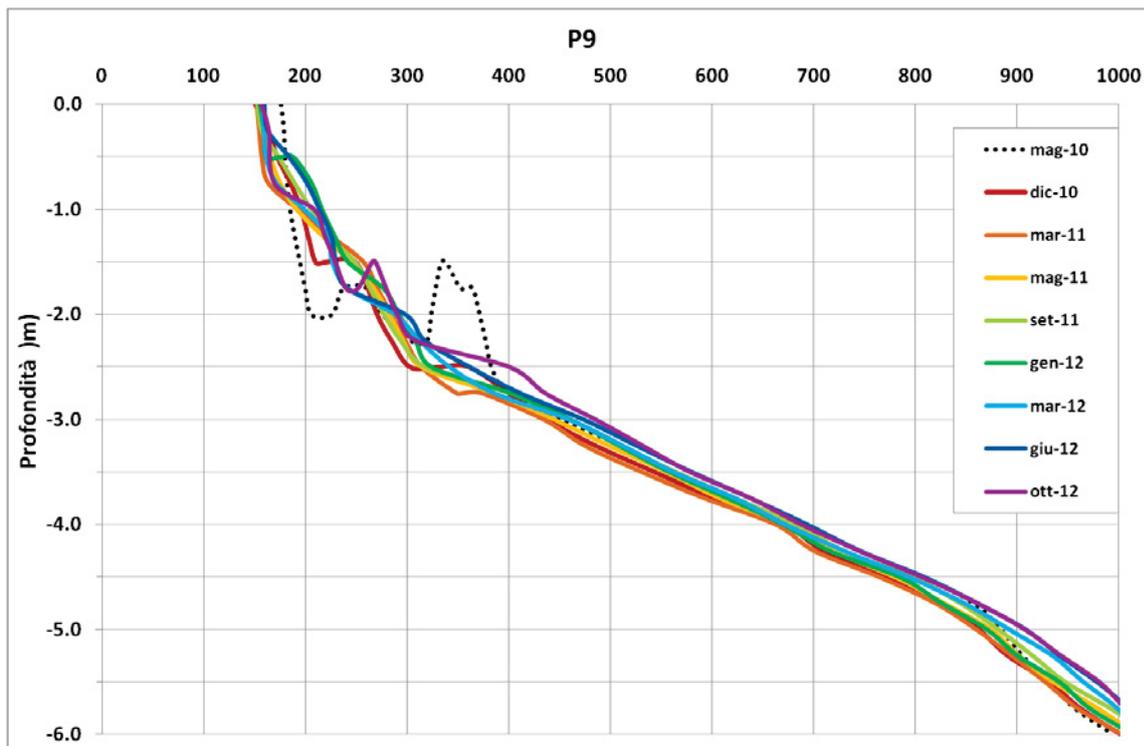
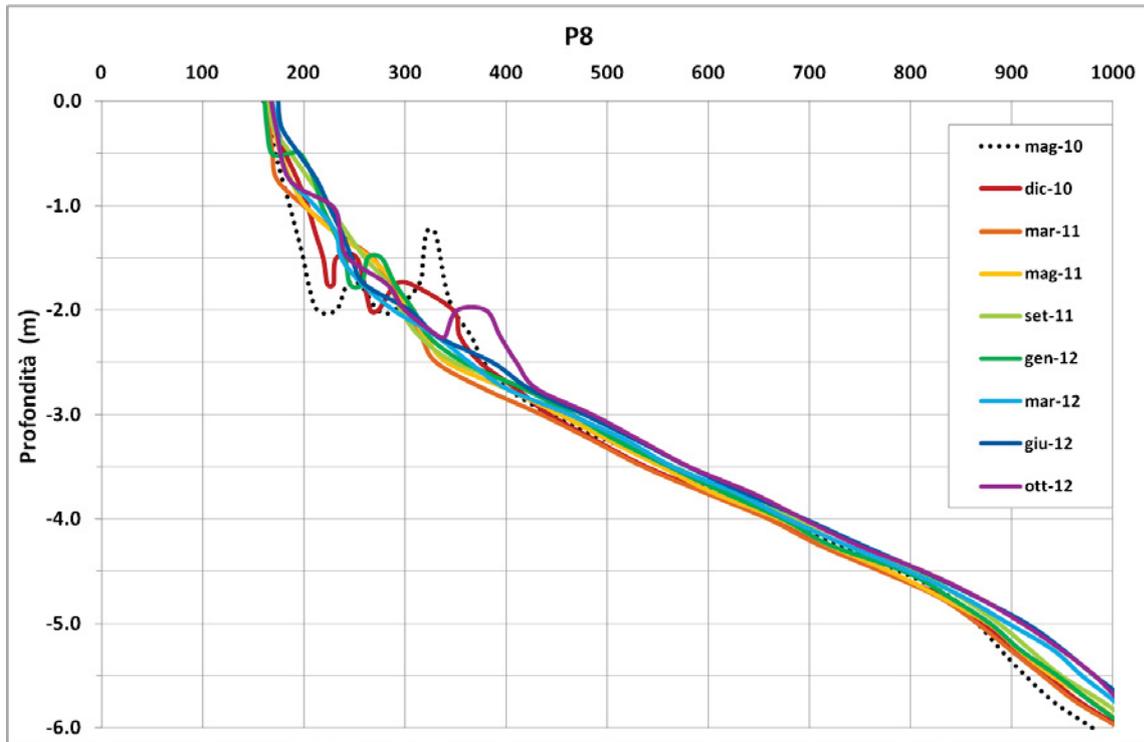
## Appendice B Elaborazione dei profili batimetrici

Di seguito sono riportati i profili batimetrici eseguiti da Maggio 2010 ad Ottobre 1010, elencati da Nord verso Sud.

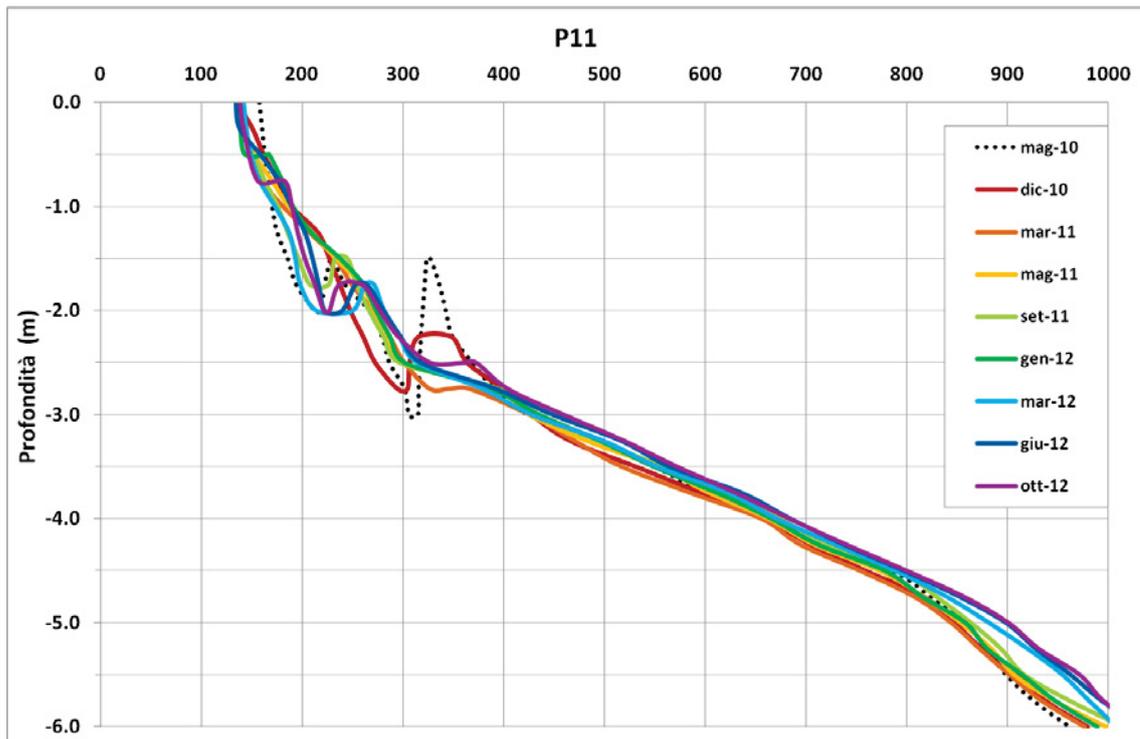
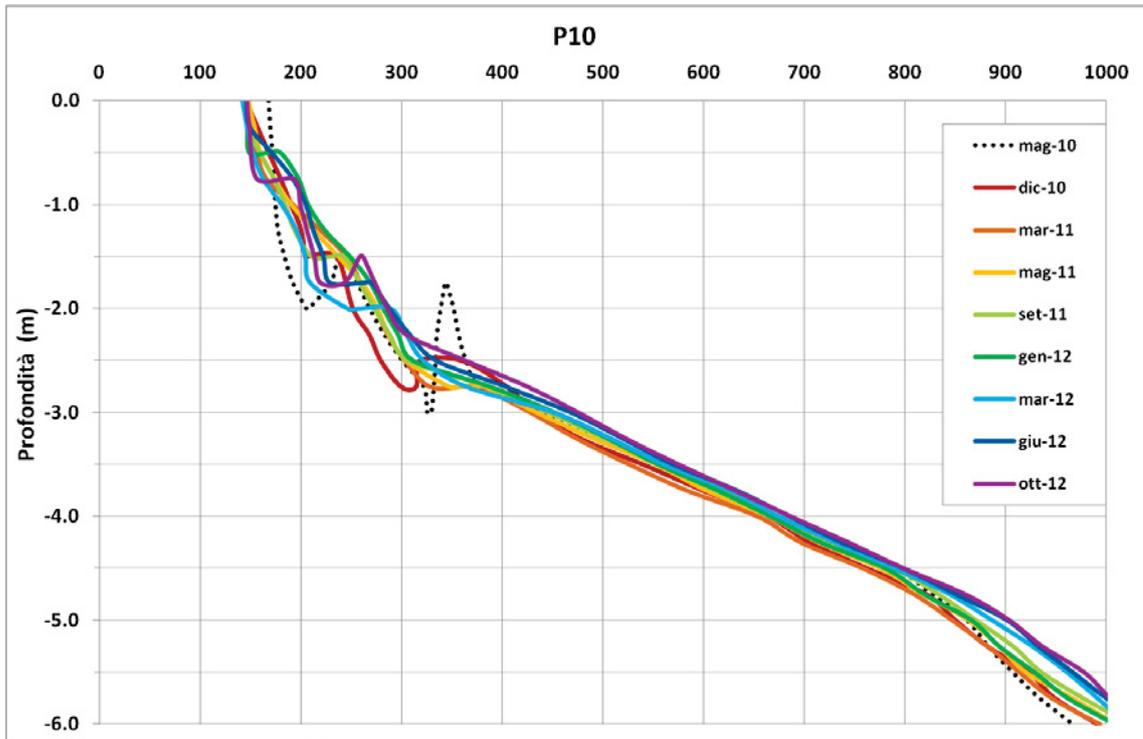


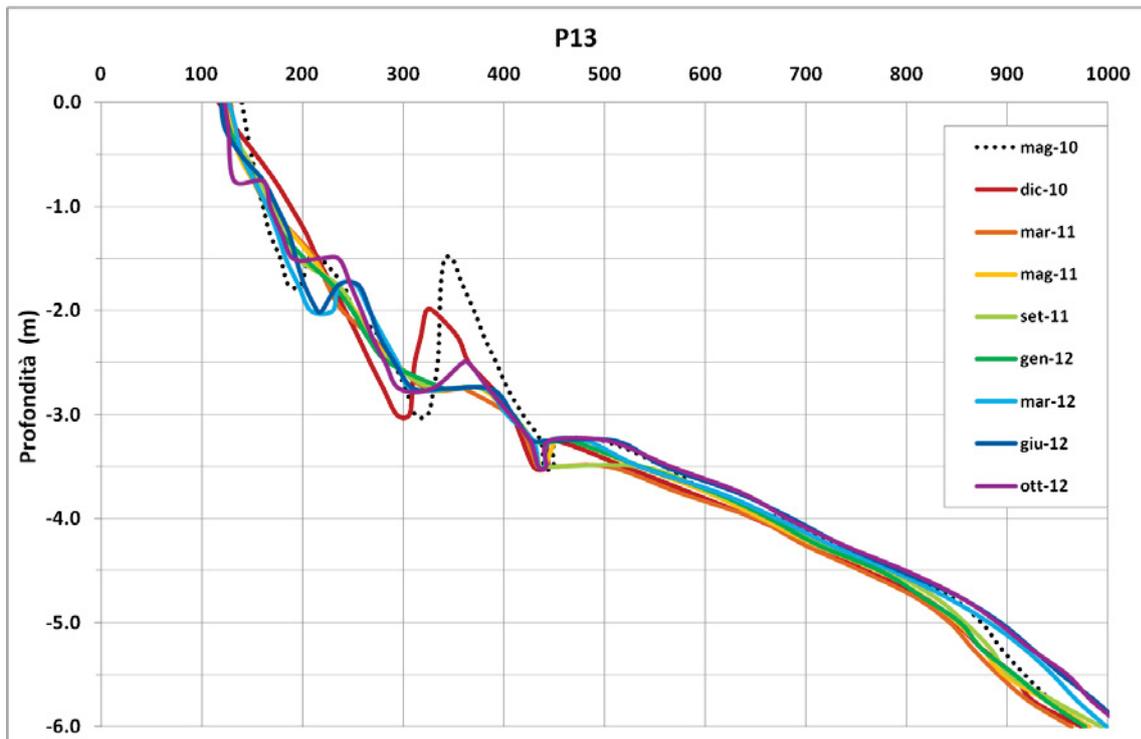
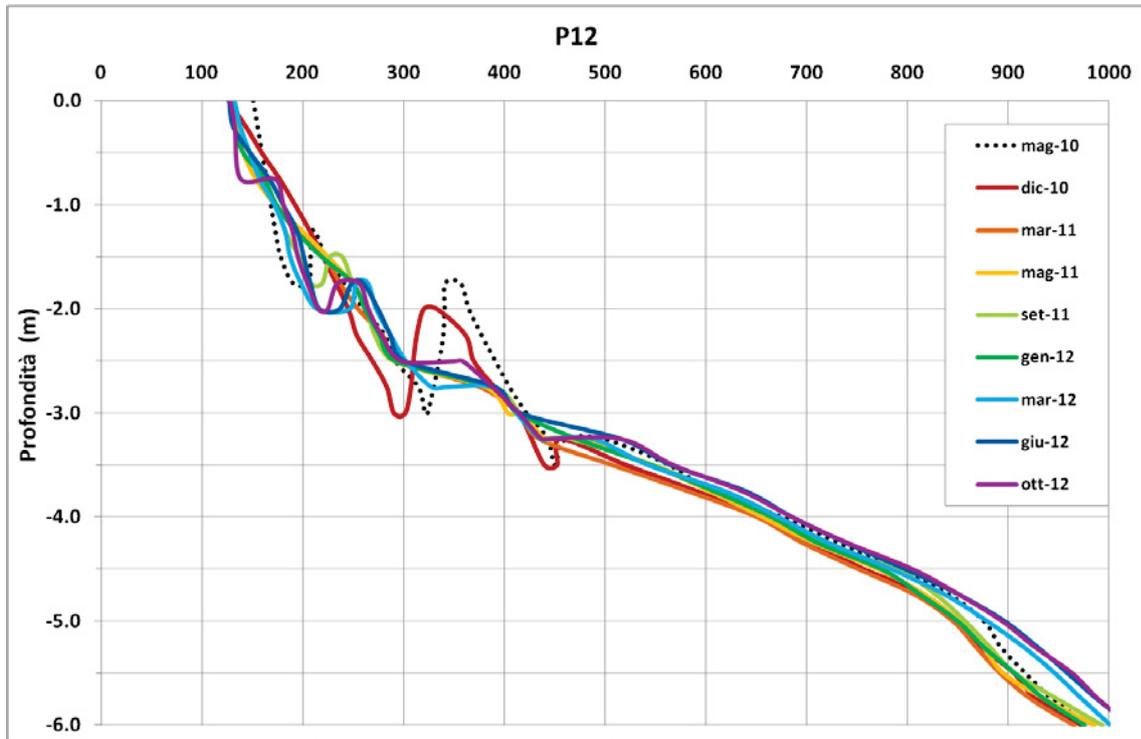


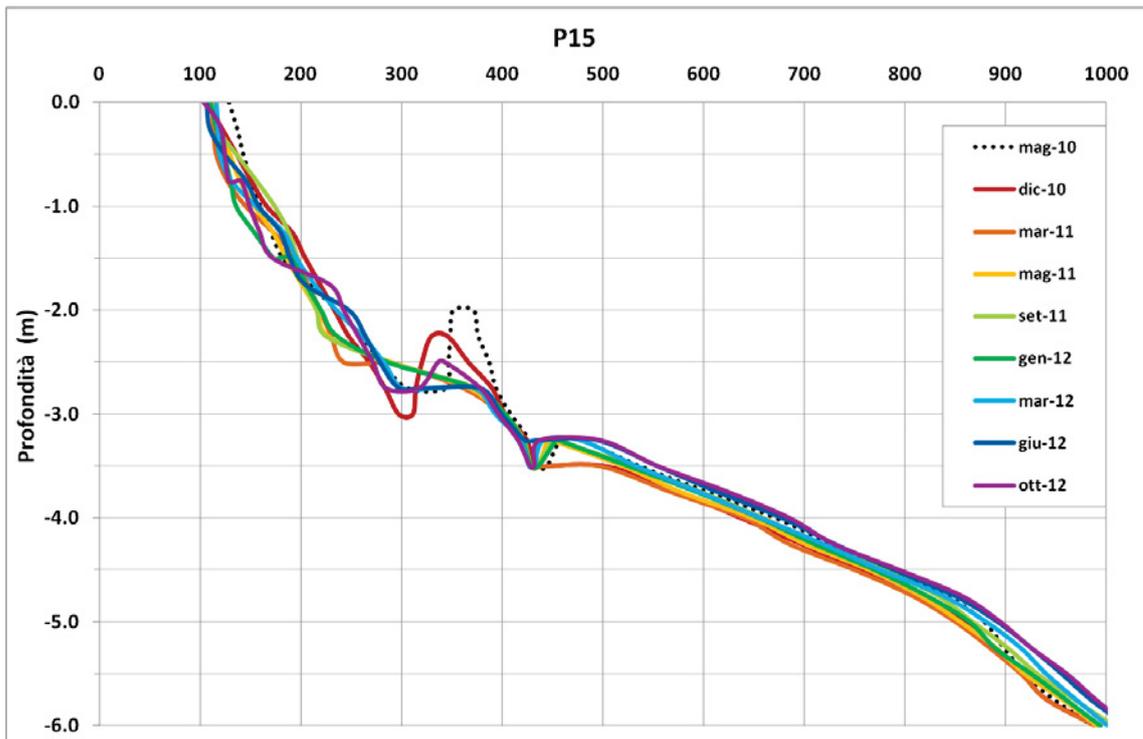
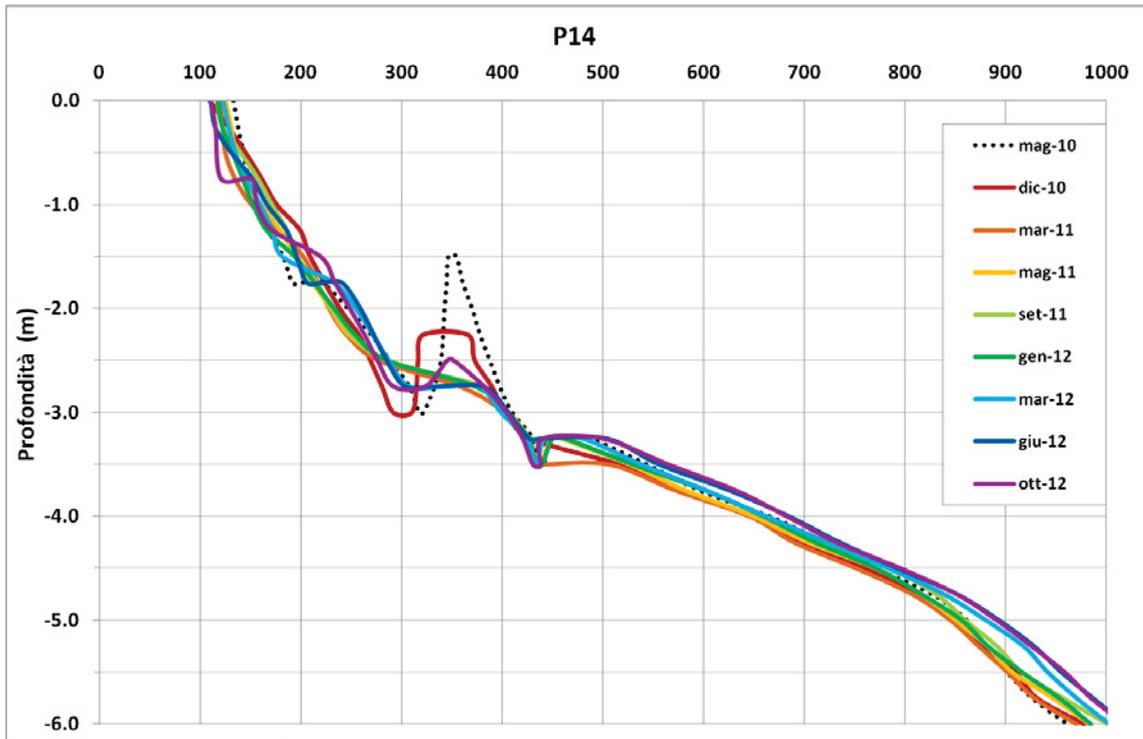


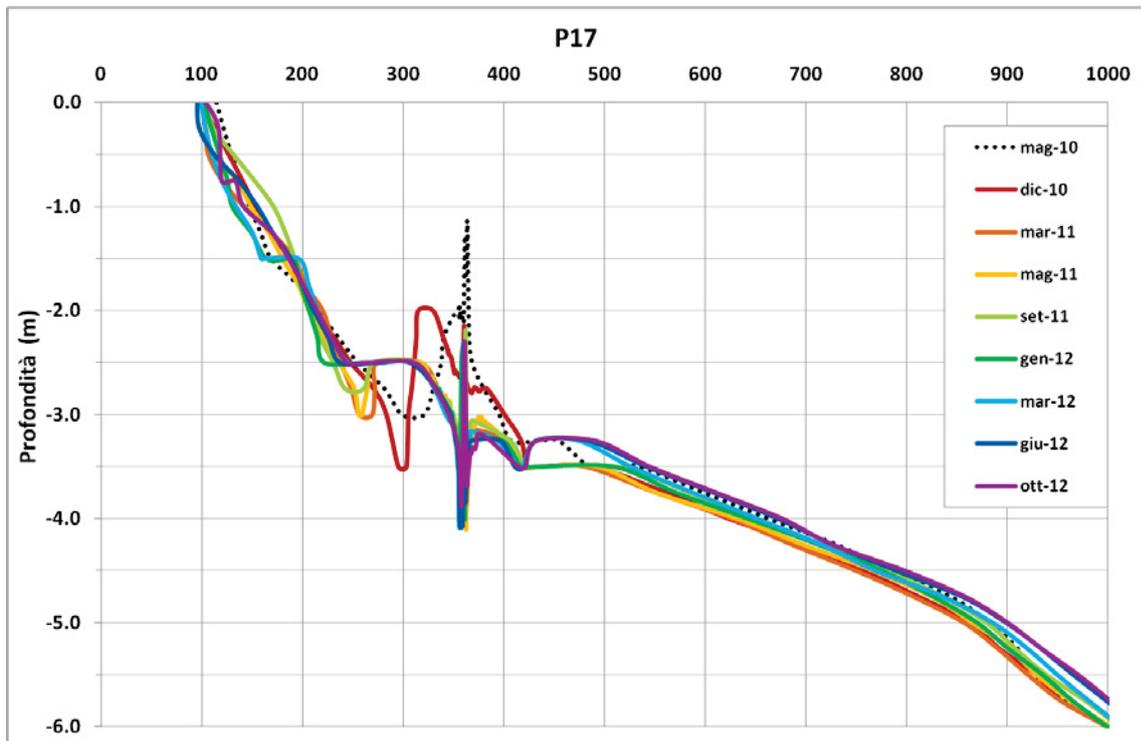
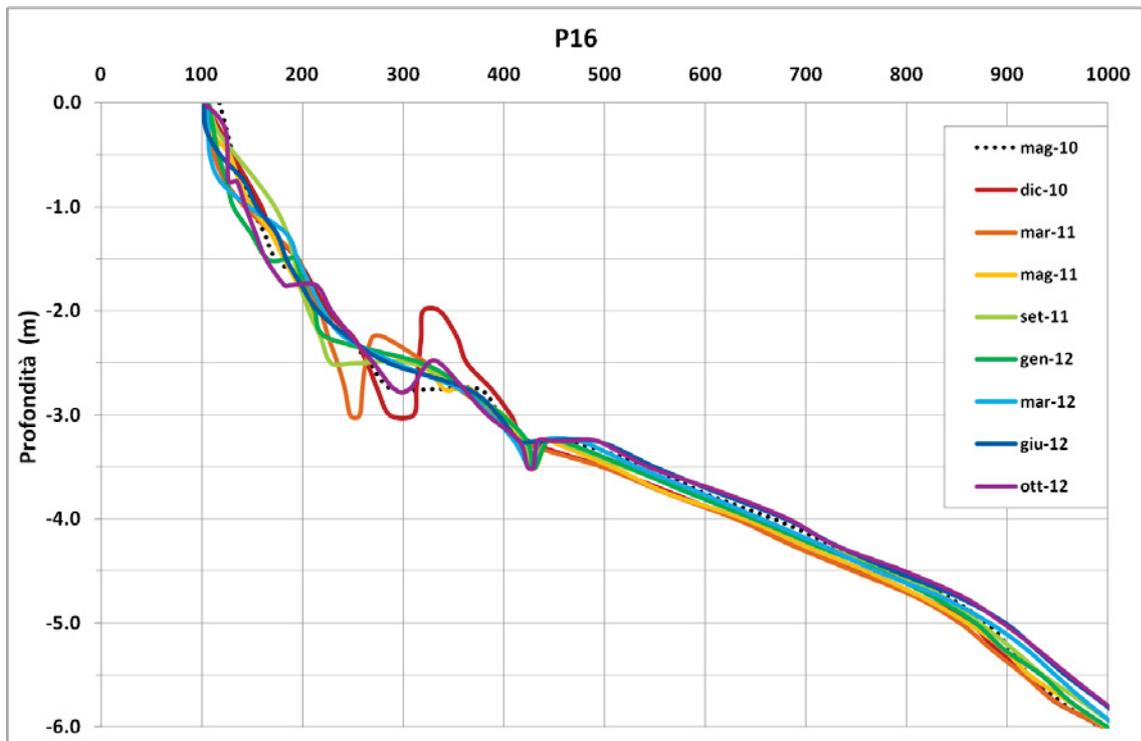


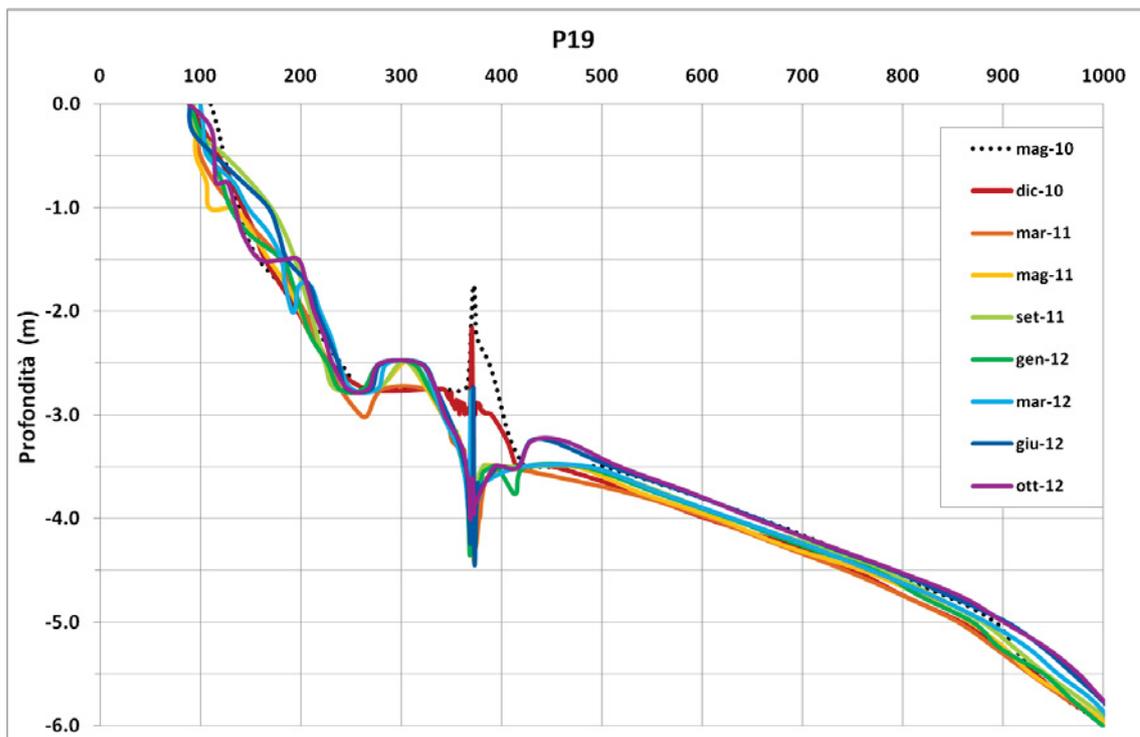
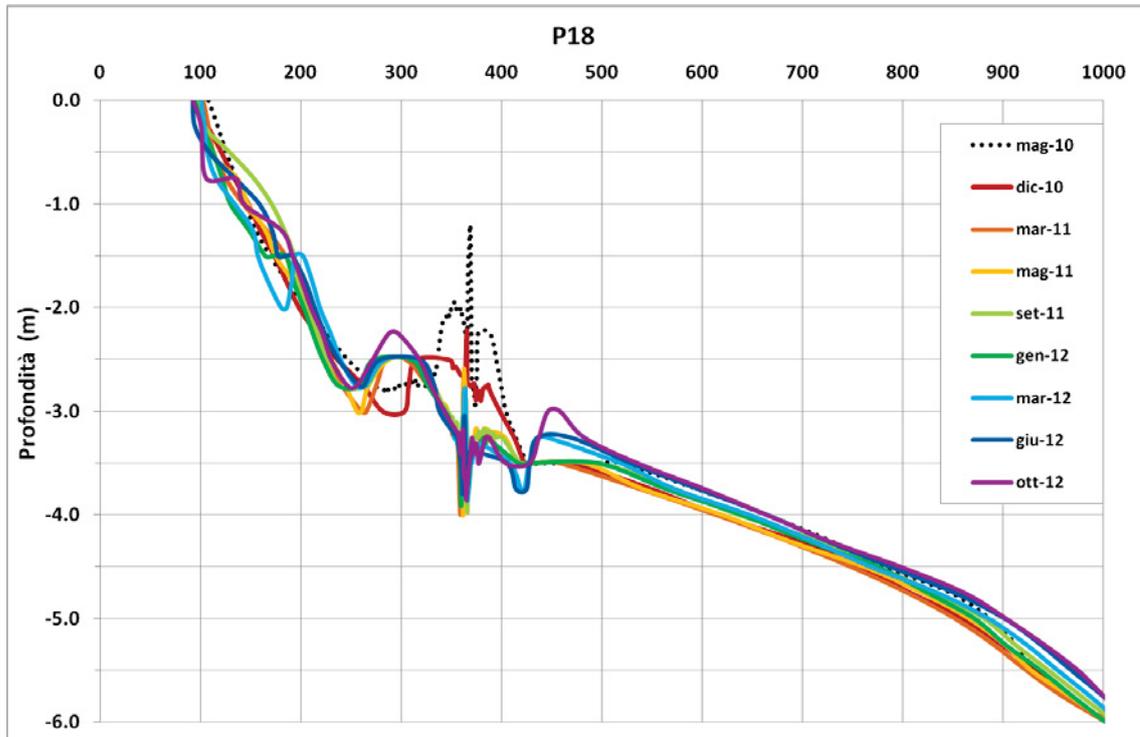
Appendice B



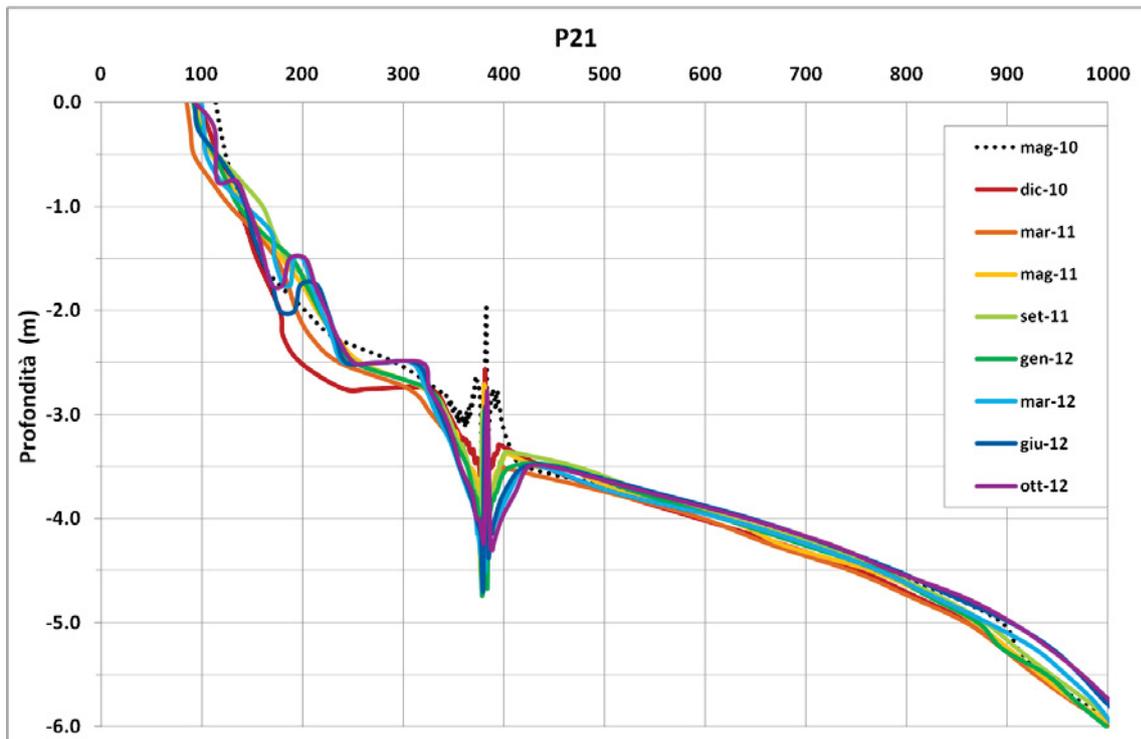
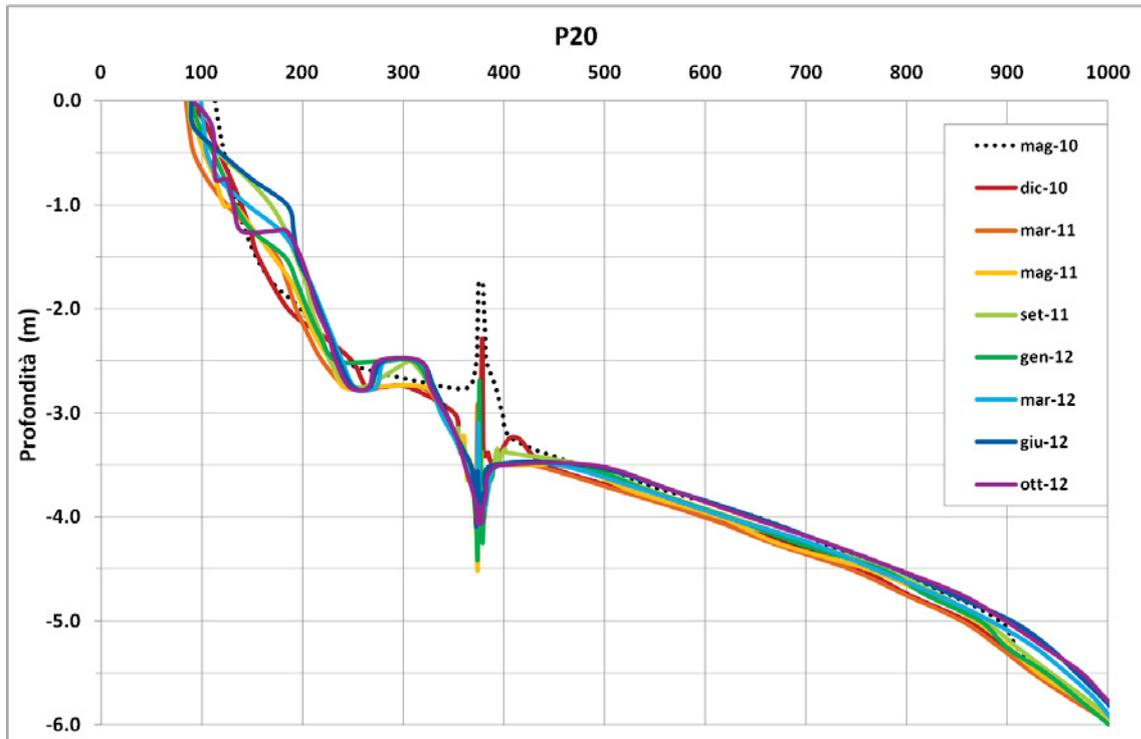


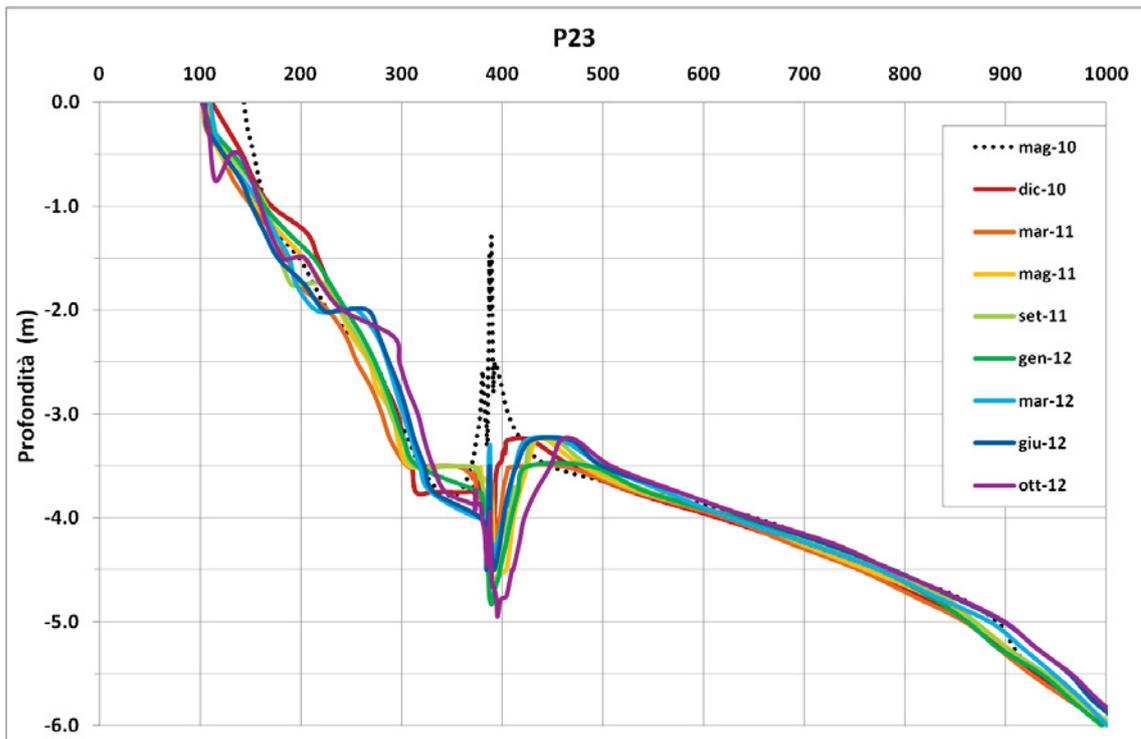
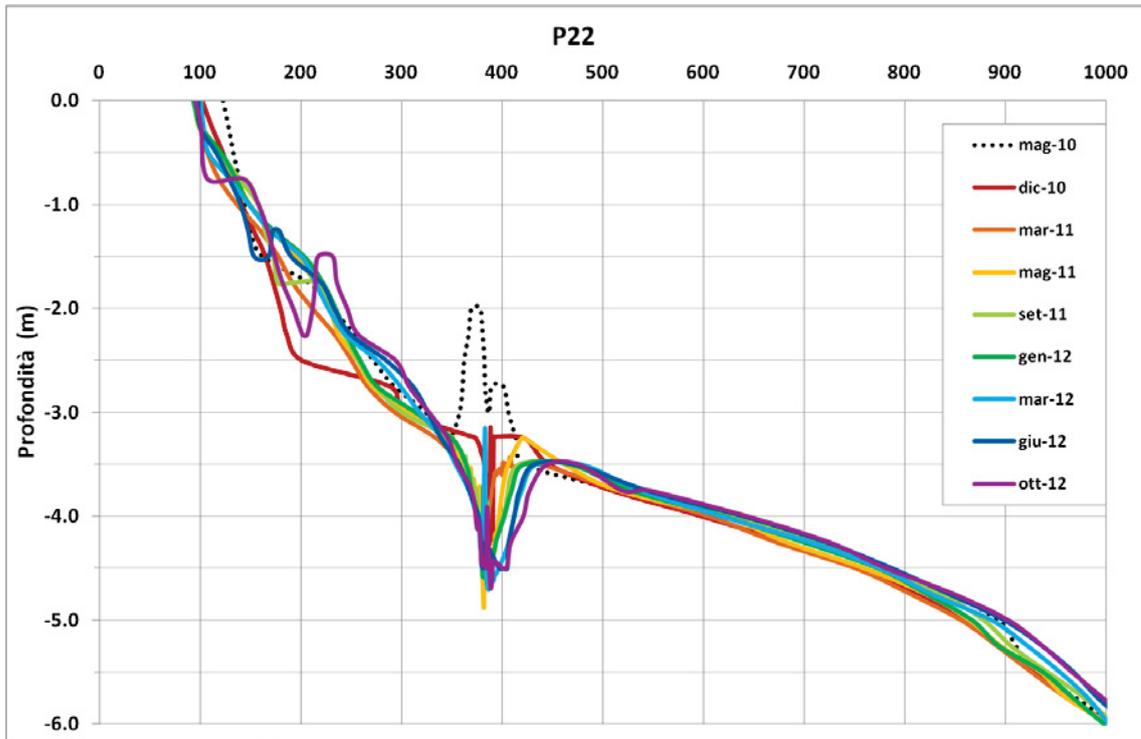




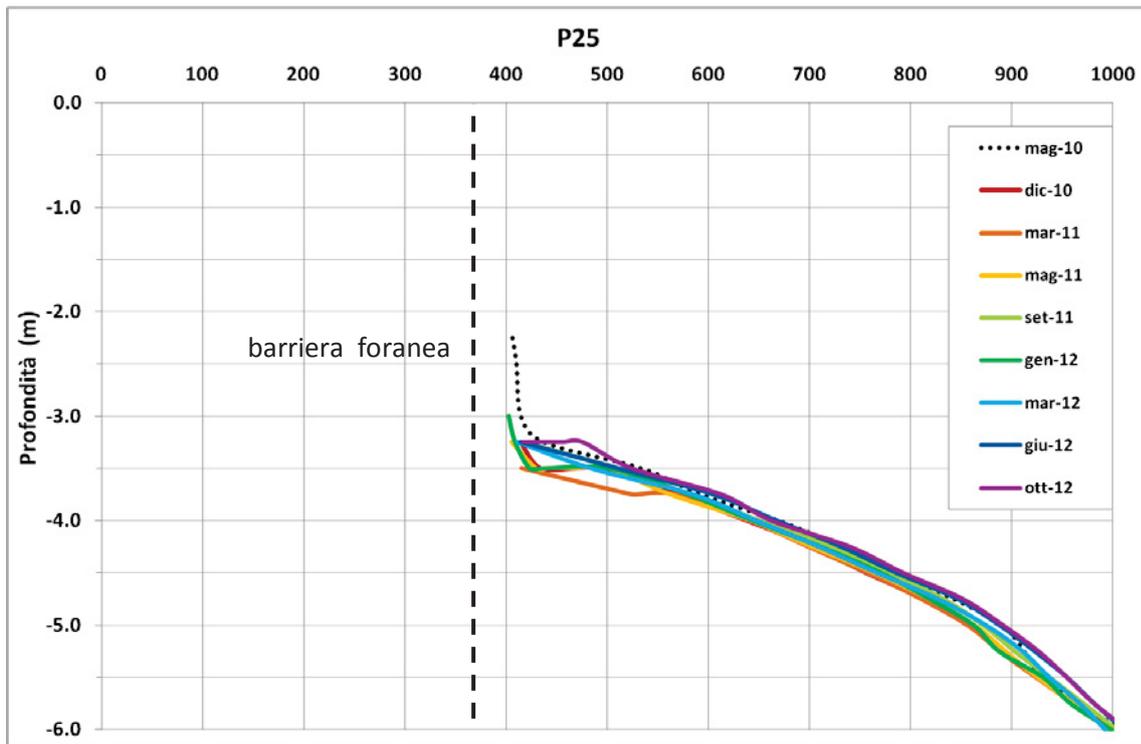
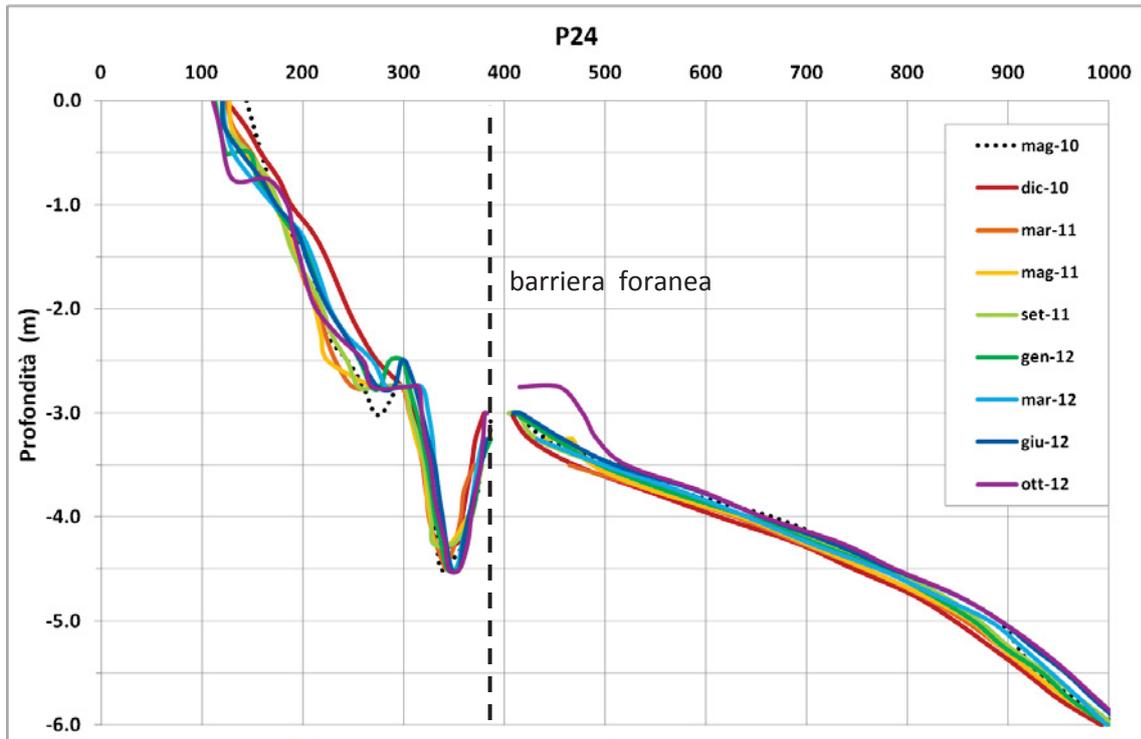


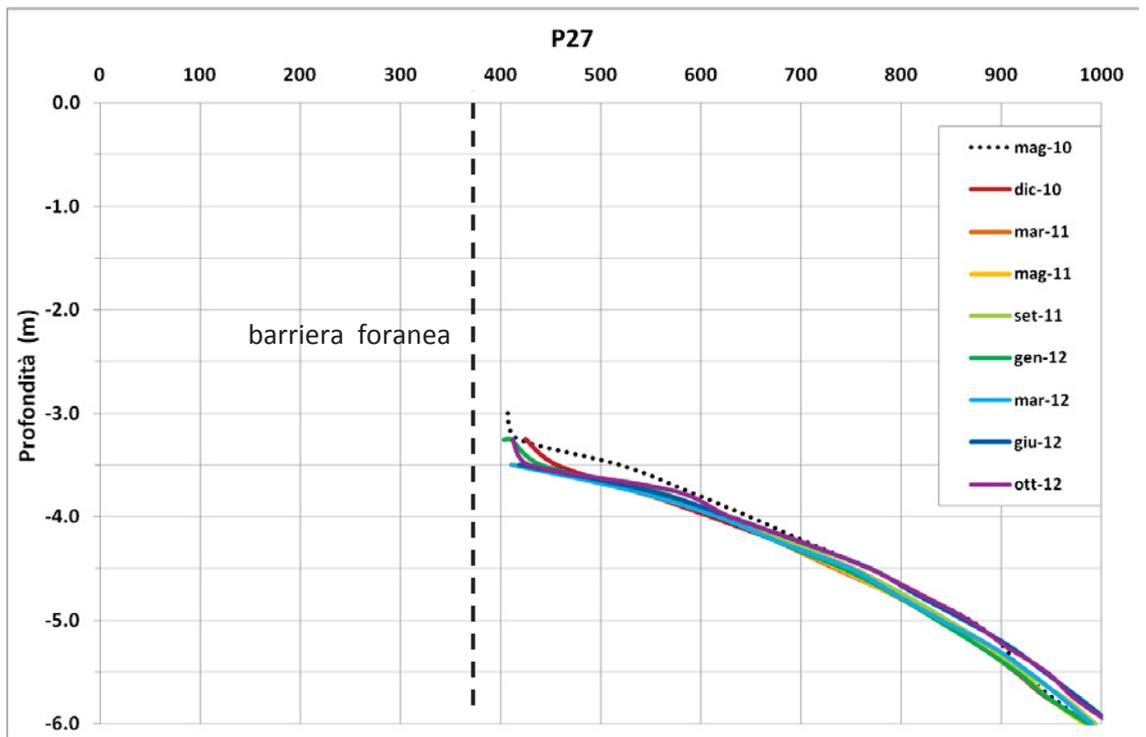
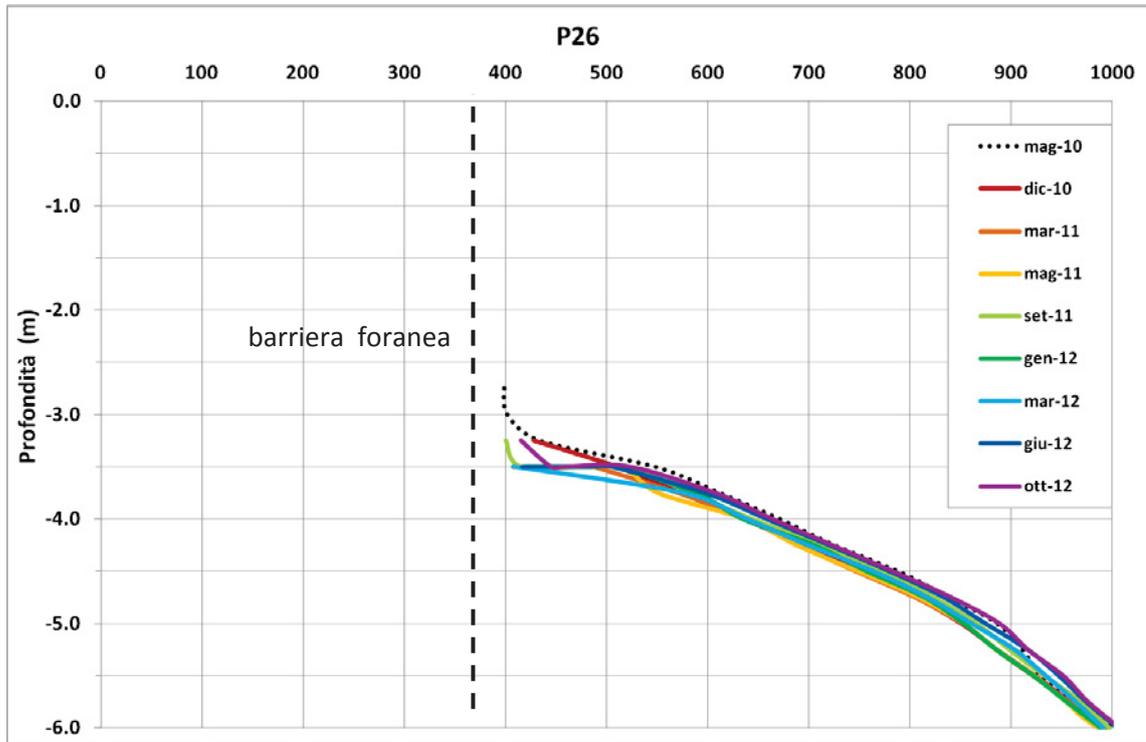
Appendice B

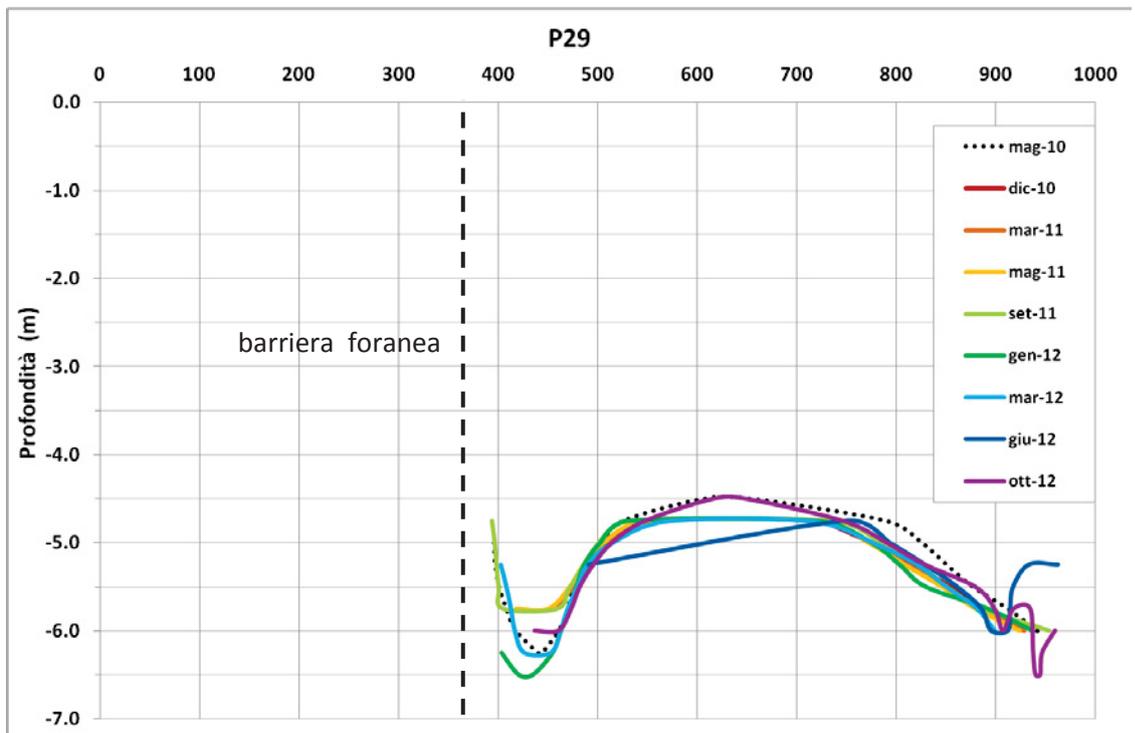
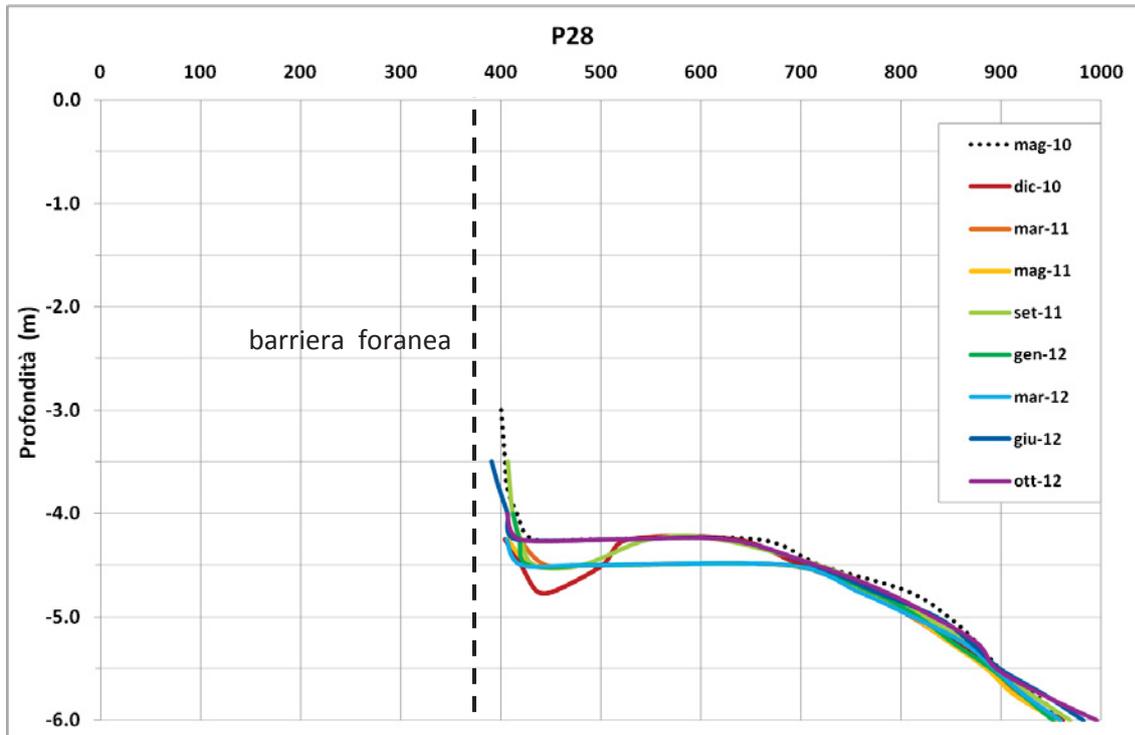




Appendice B







## Appendice C Mappe Sedimentologiche

Di seguito sono riportate le tabelle riassuntive dei parametri tessiturali relativi ai campioni raccolti durante le campagne sedimentologiche di Dicembre 2010, Maggio 2011 ed Ottobre 2012.

### Campioni raccolti in Dicembre 2010

Sono stati raccolti 70 campioni di spiaggia emersa e sommersa nella campagna di Dicembre 2010 (Tab. C.1).

Sigla campione	X Gauss Boaga Est	Y Gauss Boaga Est	quota (m)	Sabbia (%)	Fango (%)	Mz (phi)	Dev, St (phi)	Sk
P02SP	2304333,669	4926911,680	1,41	99,52	0,48	1,920	0,389	0,134
P02BA	2304348,493	4926913,814	0,82	99,02	0,98	1,924	0,412	0,087
P02-1	2304351,567	4926914,609	-1,00	98,37	1,63	2,058	0,455	0,063
P02-2	2304494,623	4926944,565	-2,00	96,86	3,14	3,203	0,301	-0,017
P02-3	2304673,744	4926982,948	-3,00	96,34	3,66	3,385	0,293	0,063
P02-4	2304897,645	4927034,125	-4,00	96,18	3,82	3,406	0,298	0,055
P02-5	2305074,767	4927081,704	-5,00	94,54	5,46	3,458	0,287	0,114
P02-6	2305174,723	4927097,697	-6,00	81,30	18,70	3,619	0,511	0,311
P04SP	2304370,830	4926709,817	1,25	99,79	0,21	1,606	0,407	0,132
P04BA	2304385,776	4926714,041	0,57	98,31	1,69	1,999	0,495	0,045
P04-1	2304387,280	4926714,448	-1,00	99,33	0,67	2,129	0,468	0,125
P04-2	2304516,431	4926735,913	-2,00	98,46	1,54	3,101	0,336	-0,054
P04-3	2304692,543	4926765,600	-3,00	96,28	3,72	3,335	0,290	0,075
P04-4	2304900,452	4926835,529	-4,00	96,53	3,47	3,328	0,336	-0,027
P04-5	2305093,009	4926880,543	-5,00	88,77	11,23	3,528	0,399	0,215
P06SP	2304437,670	4926521,627	1,38	99,45	0,55	2,172	0,350	0,156
P06BA	2304458,493	4926526,019	0,20	99,48	0,52	1,628	0,632	0,085
P06-1	2304459,054	4926525,334	-1,00	99,45	0,55	2,210	0,467	0,105
P06-2	2304575,640	4926524,271	-2,00	97,56	2,44	3,089	0,434	-0,176
P06-3	2304708,044	4926573,456	-3,00	97,25	2,75	3,277	0,313	-0,086
P06-4	2304932,595	4926637,515	-4,00	95,90	4,10	3,387	0,293	0,071

Appendice C

Sigla campione	X Gauss Boaga Est	Y Gauss Boaga Est	quota (m)	Sabbia (%)	Fango (%)	Mz (phi)	Dev, St (phi)	Sk
P06-5	2305130,961	4926683,599	-5,00	94,43	5,57	3,470	0,297	0,029
P09SP	2304450,206	4926384,162	1,22	99,94	0,06	2,203	0,330	0,173
P09BA	2304469,919	4926385,181	0,27	99,01	0,99	2,107	0,624	0,260
P09-1	2304491,197	4926389,990	-1,00	99,56	0,44	1,981	0,472	0,148
P09-2	2304582,862	4926415,221	-2,00	97,39	2,61	3,067	0,422	-0,088
P09-3	2304657,715	4926430,219	-3,00	98,03	1,97	2,967	0,551	-0,313
P09-4	2304947,107	4926498,647	-4,00	96,52	3,48	3,334	0,331	-0,025
P09-5	2305136,935	4926544,793	-5,00	94,98	5,02	3,387	0,345	-0,032
P12SP	2304471,802	4926247,626	0,90	99,47	0,53	2,347	0,367	0,175
P12BA	2304489,231	4926251,253	0,20	99,46	0,54	1,873	0,510	0,101
P12-1	2304506,430	4926255,970	-1,00	99,67	0,33	1,965	0,525	0,034
P12-2	2304609,430	4926280,593	-2,00	96,54	3,46	3,169	0,377	-0,024
P12-2_5CR	2304709,689	4926291,670	-2,50	98,96	1,04	2,333	0,714	0,081
P12-3_5TR	2304668,996	4926285,795	-3,50	99,03	0,97	2,305	0,640	0,150
P12-4	2305008,105	4926367,950	-4,00	96,70	3,30	3,364	0,288	0,055
P12-5	2305153,736	4926406,991	-5,00	94,19	5,81	3,455	0,304	0,086
P12-6	2305314,044	4926443,588	-6,00	71,07	28,93	3,771	0,673	0,341
P15SP	2304485,219	4926105,581	1,64	98,58	1,42	2,242	0,487	0,135
P15BA	2304499,458	4926109,265	0,36	99,71	0,29	2,119	0,449	0,120
P15-1	2304516,253	4926109,587	-1,00	99,00	1,00	2,025	0,525	0,139
P15-2	2304625,094	4926137,759	-2,00	98,53	1,47	2,853	0,379	0,021
P15-2_5CR	2304739,481	4926160,096	-2,50	99,12	0,88	2,549	0,669	-0,116
P15-3	2304680,488	4926143,803	-3,00	97,14	2,86	3,079	0,440	-0,212
P15-4	2304999,572	4926223,476	-4,00	97,50	2,50	3,318	0,331	-0,093
P15-5	2305236,032	4926285,454	-5,00	92,26	7,74	3,398	0,436	-0,054
P18BA	2304526,587	4925976,705	0,32	99,82	0,18	2,273	0,387	0,131
P18-1	2304541,359	4925981,400	-1,00	99,44	0,56	2,238	0,483	-0,020
P18-2	2304654,272	4926003,961	-2,00	98,54	1,46	2,986	0,377	0,032
P18-3	2304786,225	4926032,052	-3,00	98,22	1,78	2,638	0,651	-0,044
P18-3_5TR	2304738,070	4926020,364	-3,50	97,25	2,75	2,610	0,651	0,147
P18-4	2304997,513	4926083,621	-4,00	95,48	4,52	3,340	0,397	-0,125
P18-5	2305267,659	4926148,405	-5,00	93,34	6,66	3,459	0,387	-0,071
P21DU	2304524,354	4925815,493	4,46	98,85	1,15	2,191	0,404	0,163
P21SP	2304546,793	4925840,082	1,68	97,50	2,50	2,330	0,578	0,236
P21BA	2304576,771	4925847,327	0,24	99,40	0,60	2,056	0,547	-0,047
P21-1	2304598,874	4925853,557	-1,00	99,86	0,14	2,330	0,447	0,079
P21-2	2304677,449	4925866,726	-2,00	98,09	1,91	3,021	0,440	-0,127
P21-3	2304819,627	4925900,027	-3,00	97,54	2,46	2,998	0,504	-0,189
P21-4	2305030,640	4925948,865	-4,00	95,82	4,18	3,265	0,342	-0,003
P21-5	2305303,502	4926017,682	-5,00	91,46	8,54	3,280	0,585	-0,122
P21-6	2305451,093	4926051,417	-6,00	74,31	25,69	3,757	0,536	0,275
P24SP	2304626,777	4925718,847	1,30	99,44	0,56	1,944	0,424	0,174

## Appendice C

Sigla campione	X Gauss Boaga Est	Y Gauss Boaga Est	quota (m)	Sabbia (%)	Fango (%)	Mz (phi)	Dev, St (phi)	Sk
P24BA	2304657,892	4925725,920	0,22	99,31	0,69	2,062	0,529	0,196
P24-1	2304678,577	4925730,253	-1,00	99,25	0,75	2,275	0,525	0,200
P24-2	2304747,111	4925742,025	-2,00	99,49	0,51	2,118	0,617	-0,091
P24-3	2304909,529	4925799,103	-3,00	99,19	0,81	2,252	0,663	0,211
P24-4	2305033,307	4925819,324	-4,00	96,81	3,19	3,324	0,308	0,028
P24-5	2305340,800	4925884,959	-5,00	95,38	4,62	3,408	0,333	-0,021
P27-3,5	2305046,272	4925515,872	-3,50	96,69	3,31	3,419	0,282	0,026
P27-4	2305149,586	4925545,390	-4,00	95,01	4,99	3,427	0,334	-0,075
P27-5	2305307,719	4925577,017	-5,00	92,23	7,77	3,321	0,454	0,059
P29-5	2305343,563	4925338,763	-5,00	96,09	3,91	3,238	0,392	-0,136
P29-6	2305117,959	4925290,269	-6,00	95,79	4,21	3,160	0,495	-0,236
P29-7	2305080,007	4925277,618	-7,00	33,66	66,34	6,028	3,125	0,113

Tab. C.1 - Parametri tessiturali secondo la classificazione di Folk & Ward (1957) dei campioni di Dicembre 2010.

### Campioni raccolti in Maggio 2011

Sono stati raccolti 18 campioni di spiaggia sommersa nella campagna di Maggio 2011 (Tab. C.2).

Sigla campione	X Gauss Boaga fuso Est	X Gauss Boaga fuso Est	Quota (m)	Sabbia (%)	Fango (%)	Mz (phi)	$\sigma$ (phi)	Sk
P06-2	2304666,003	4926564,116	-2,00	99,58	0,41	2,33	0,532	0,081
P06-3	2304783,379	4926597,222	-3,00	98,98	1,01	3,233	0,266	-0,088
P06-4	2305022,223	4926666,628	-4,00	97,59	2,41	3,221	0,281	-0,032
P09-2	2304637,198	4926426,210	-2,00	99,27	0,73	2,934	0,397	-0,081
P09-3	2304808,318	4926462,724	-3,00	99,35	0,65	3,018	0,302	-0,004
P09-4	2305040,685	4926520,712	-4,00	93,55	6,45	3,275	0,428	0,178
P12-2	2304652,651	4926286,129	-2,00	99,98	0,02	2,781	0,512	-0,183
P12-3	2304802,867	4926323,234	-3,00	98,97	1,02	2,852	0,439	-0,107
P12-4	2305046,628	4926380,898	-4,00	96,61	3,39	3,265	0,312	-0,016
P15-2	2304635,107	4926139,423	-2,00	99,05	0,94	2,975	0,395	-0,065
P15-3	2304823,320	4926185,141	-3,00	99,26	0,74	3,06	0,332	-0,109
P15-4	2305112,843	4926254,764	-4,00	96,78	3,23	3,276	0,391	-0,184
P18-2	2304646,890	4925993,551	-2,00	98,46	1,53	2,777	0,477	0,072
P18-3	2304788,349	4926035,243	-3,00	97,47	2,52	3,191	0,296	0,006

## Appendice C

Sigla campione	X Gauss Boaga fuso Est	X Gauss Boaga fuso Est	Quota (m)	Sabbia (%)	Fango (%)	Mz (phi)	$\sigma$ (phi)	Sk
<b>P18-4</b>	2305077,479	4926106,004	-4,00	97,94	2,06	3,19	0,345	-0,217
<b>P21-2</b>	2304691,426	4925869,552	-2,00	99,45	0,55	2,598	0,539	-0,067
<b>P21-3</b>	2304825,452	4925896,724	-3,00	96,66	3,34	2,995	0,552	-0,217
<b>P21-4</b>	2305101,544	4925968,886	-4,00	93,89	6,11	3,121	0,555	0,083

Tab. C.2 - Parametri tessiturali secondo la classificazione di Folk & Ward (1957) dei campioni di Maggio 2011.

### Campioni raccolti in Ottobre 2012

Sono stati raccolti 71 campioni superficiali di spiaggia emersa e sommersa nella campagna di Ottobre 2012 (Tab. C.3).

Sigla campione	X GaussBoaga fuso Est	Y GaussBoaga fuso Est	Quota (m)	Sabbia (%)	Fango (%)	Mz (phi)	$\sigma$ (phi)	Sk
<b>P02-Sp</b>	2304330,370	4926904,997	1,00	99,09	0,91	1,98	0,42	0,13
<b>P02-Ba</b>	2304375,860	4926914,517	0,00	99,68	0,32	2,01	0,45	0,00
<b>P02-1</b>	2304417,875	4926923,781	-1,00	99,64	0,36	1,73	0,49	0,08
<b>P02-2</b>	2304552,620	4926956,580	-2,00	97,93	2,07	3,19	0,29	0,03
<b>P02-3</b>	2304771,703	4927007,740	-3,00	95,64	4,36	3,26	0,32	0,10
<b>P02-4</b>	2305017,364	4927066,921	-4,00	96,48	3,52	3,26	0,32	0,03
<b>P02-5</b>	2305147,866	4927093,922	-5,00	89,22	10,78	3,40	0,47	0,24
<b>P03-2</b>	2304614,516	4926765,109	-2,00	98,64	1,36	2,73	0,42	0,01
<b>P04-Sp</b>	2304365,604	4926706,425	1,00	99,09	0,91	2,24	0,41	0,20
<b>P04-Ba</b>	2304407,619	4926715,026	0,00	99,30	0,70	2,08	0,41	0,05
<b>P04-1</b>	2304441,364	4926722,636	-1,00	99,32	0,68	2,51	0,39	0,20
<b>P04-2</b>	2304537,485	4926737,368	-2,00	96,83	3,17	3,27	0,32	0,03
<b>P04-3</b>	2304716,134	4926787,947	-3,00	95,68	4,32	3,38	0,32	0,05
<b>P04-4</b>	2304941,792	4926844,643	-4,00	95,83	4,17	3,34	0,33	0,06
<b>P04-5</b>	2305170,595	4926896,030	-5,00	86,54	13,46	3,48	0,50	0,31
<b>P04-6</b>	2305287,527	4926930,310	-6,00	75,36	24,64	3,73	0,95	0,56
<b>P06-Sp</b>	2304409,604	4926509,911	1,00	99,27	0,73	1,91	0,43	0,17
<b>P06-Ba</b>	2304504,222	4926527,776	0,00	99,56	0,44	1,61	0,51	0,05
<b>P06-1</b>	2304522,087	4926532,408	-1,00	99,72	0,28	1,94	0,51	0,09
<b>P06-2</b>	2304632,920	4926526,136	-2,00	98,84	1,16	2,92	0,39	0,03
<b>P06-3</b>	2304759,582	4926590,778	-3,00	97,01	2,99	3,41	0,31	0,00
<b>P06-4</b>	2305009,051	4926650,472	-4,00	93,93	6,07	3,41	0,37	0,01
<b>P06-5</b>	2305202,202	4926698,383	-5,00	85,78	14,22	3,53	0,50	0,36
<b>P09-Sp</b>	2304457,906	4926380,887	1,00	99,20	0,80	1,60	0,48	0,14
<b>P09-Ba</b>	2304504,222	4926392,467	0,00	99,67	0,33	1,65	0,40	0,18

## Appendice C

<b>Sigla campione</b>	<b>X GaussBoaga fuso Est</b>	<b>Y GaussBoaga fuso Est</b>	<b>Quota (m)</b>	<b>Sabbia (%)</b>	<b>Fango (%)</b>	<b>Mz (phi)</b>	<b><math>\sigma</math> (phi)</b>	<b>Sk</b>
<b>P09-1</b>	2304520,102	4926396,106	-1,00	99,49	0,51	2,12	0,44	0,06
<b>P09-2</b>	2304600,224	4926417,938	-2,00	98,50	1,50	2,92	0,38	-0,02
<b>P09-3</b>	2304789,133	4926459,760	-3,00	96,94	3,06	3,19	0,29	0,07
<b>P09-4</b>	2305060,739	4926521,532	-4,00	96,25	3,75	3,34	0,30	0,09
<b>P09-5</b>	2305177,596	4926573,330	-5,00	86,58	13,42	3,45	0,62	0,42
<b>P12-Sp</b>	2304480,402	4926244,585	1,00	99,23	0,77	1,87	0,43	0,19
<b>P12-Ba</b>	2304508,523	4926251,863	0,00	99,94	0,06	1,56	0,44	0,05
<b>P12-1</b>	2304522,418	4926253,518	-1,00	98,74	1,26	2,21	0,60	0,06
<b>P12-1,8</b>	2304558,949	4926244,558	-1,80	99,33	0,67	2,55	0,48	-0,09
<b>P12-2</b>	2304644,350	4926290,698	-2,00	96,51	3,49	3,10	0,37	-0,04
<b>P12-3</b>	2304755,934	4926306,439	-3,00	96,60	3,40	3,14	0,32	0,05
<b>P12-4</b>	2305012,091	4926379,471	-4,00	94,49	5,51	3,41	0,35	0,03
<b>P12-5</b>	2305216,951	4926416,891	-5,00	92,62	7,38	3,33	0,42	0,23
<b>P12-6</b>	2305377,300	4926465,046	-6,00	68,64	31,36	3,84	0,92	0,52
<b>P15-Sp</b>	2304488,342	4926102,990	1,00	99,12	0,88	1,84	0,50	0,06
<b>P15-Ba</b>	2304523,741	4926111,591	0,00	99,97	0,03	1,27	0,69	0,29
<b>P15-1</b>	2304554,508	4926119,200	-1,00	99,02	0,98	2,13	0,60	0,04
<b>P15-2</b>	2304635,952	4926139,973	-2,00	98,98	1,02	2,94	0,39	-0,20
<b>P15-3</b>	2304735,915	4926152,604	-3,00	97,84	2,16	3,23	0,28	-0,03
<b>P15-4</b>	2305048,225	4926238,375	-4,00	95,10	4,90	3,24	0,36	0,08
<b>P15-5</b>	2305257,414	4926300,392	-5,00	91,94	8,06	3,34	0,43	0,20
<b>P18-Sp</b>	2304526,388	4925973,304	1,00	98,32	1,68	1,92	0,54	0,07
<b>P18-Ba</b>	2304547,561	4925976,943	0,00	99,37	0,63	2,04	0,38	0,10
<b>P18-1</b>	2304558,478	4925979,259	-1,00	99,60	0,40	2,34	0,42	0,25
<b>P18-2</b>	2304644,214	4925992,332	-2,00	99,06	0,94	2,55	0,53	0,12
<b>P18-3</b>	2304764,079	4926029,642	-3,00	96,60	3,40	3,28	0,32	0,01
<b>P18-4</b>	2305090,300	4926113,789	-4,00	94,01	5,99	3,37	0,37	0,12
<b>P18-5</b>	2305317,849	4926137,795	-5,00	90,26	9,74	3,38	0,56	0,31
<b>P21-Sp</b>	2304552,523	4925836,671	1,00	99,50	0,50	2,01	0,36	0,11
<b>P21-Ba</b>	2304586,930	4925846,596	0,00	99,41	0,59	1,98	0,35	0,16
<b>P21-1</b>	2304602,479	4925848,912	-1,00	99,21	0,79	2,25	0,42	0,03
<b>P21-2</b>	2304678,813	4925878,024	-2,00	99,69	0,31	2,93	0,35	0,07
<b>P21-3</b>	2304828,882	4925905,493	-3,00	95,55	4,45	3,20	0,40	-0,03
<b>P21-4</b>	2304896,307	4925916,639	-4,00	96,53	3,47	2,93	0,50	-0,15
<b>P21-5</b>	2305297,689	4926014,820	-5,00	94,06	5,94	3,24	0,39	0,21
<b>P21-6</b>	2305394,023	4925884,532	-6,00	74,78	25,22	3,73	0,93	0,51
<b>P24-Sp</b>	2304587,591	4925703,346	1,00	98,51	1,49	1,77	0,43	0,03
<b>P24-Ba</b>	2304632,915	4925714,594	0,00	99,39	0,61	2,01	0,38	0,22
<b>P24-1</b>	2304640,193	4925716,579	-1,00	99,59	0,41	1,81	0,51	0,00
<b>P24-2</b>	2304743,662	4925737,129	-2,00	98,92	1,08	1,34	0,57	0,16
<b>P24-3</b>	2304791,812	4925755,170	-3,00	97,49	2,51	1,85	0,73	0,21
<b>P24-4</b>	2305123,808	4925834,804	-4,00	96,92	3,08	3,11	0,34	0,02
<b>P24-5</b>	2305381,679	4925881,909	-5,00	88,81	11,19	3,41	0,54	0,33
<b>P27-3</b>	2305011,465	4925513,772	-3,00	98,01	1,99	3,19	0,29	0,04

<b>Sigla campione</b>	<b>X GaussBoaga fuso Est</b>	<b>Y GaussBoaga fuso Est</b>	<b>Quota (m)</b>	<b>Sabbia (%)</b>	<b>Fango (%)</b>	<b>Mz (phi)</b>	<b><math>\sigma</math> (phi)</b>	<b>Sk</b>
<b>P27-4</b>	2305172,249	4925544,815	-4,00	97,11	2,89	3,29	0,29	-0,02
<b>P27-5</b>	2305442,629	4925624,551	-5,00	90,57	9,43	3,46	0,40	0,26

Tab. C.3 - Parametri tessiturali secondo la classificazione di Folk & Ward (1957) dei campioni di Ottobre 2012.

*Ritengo assolutamente essenziale ringraziare tutti coloro che in maniera diversa mi hanno aiutata a raggiungere questo prestigioso traguardo.*

*In primis desidero ringraziare il Prof. Umberto Simeoni, per avermi dato la possibilità frequentare il Dottorato e per avermi incoraggiata nella ricerca, offrendomi preziosi consigli e rifilandomi seri rimproveri durante il percorso di studi. Un sentito grazie va ai miei colleghi (Corinne, Ilaria, Dario, Max, Umberto) con cui ho condiviso giorno per giorno la mia ricerca e alla Dott.ssa Michela Soldati, per i consigli e per le preziose discussioni fatte in questi anni sul mondo della modellistica numerica.*

*Un sentito grazie va al Dott. Sergio Nannini e al Comune di Ravenna, per le preziose informazioni e per aver messo a mia disposizione dati assolutamente fondamentali ed essenziali per il mio studio. Desidero ringraziare l'Ing. Chiani dell'Autorità Portuale Ravenna, l'Ing Piero Ruol dell'Università di Padova, l'Ing Mentino Preti dell'ARPA-ER per avermi concesso l'accesso ai loro archivi; il loro contributo è stato per me indispensabile. In particolare ringrazio l'Ing. Nunzio De Nigris, collaboratore dell'ing. Preti, per le stimolanti discussioni sui tanti temi affrontati e sulle problematiche riscontrate.*

*Chiaramente, oltre ai contributi scientifici, è stato per me essenziale il supporto incondizionato dei miei genitori e la presenza costante ed insostituibile di mia sorella Lilia.*

*Ringrazio i miei "compari", Alessandro e Joe, e tutti miei cari amici divisi tra Jesi (e dintorni), Ferrara, Bologna e Milano che hanno sempre creduto in me, dandomi la carica necessaria proprio quando ne avevo più bisogno. Un grazie sincero va alla mia più cara amica Barbara, sui cui ho sempre potuto contare e con cui ho condiviso quotidianamente pensieri, considerazioni, dubbi e grandi passioni!*

*Un ringraziamento particolare va a mio marito Giampaolo per essermi stato sempre vicino fin dall'inizio di questo cammino, la persona senza la quale probabilmente non sarei riuscita ad ottenere questo risultato. Per questo e per molto altro dedico a lui questa tesi.*