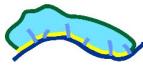
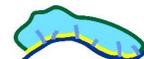


## Indice

<b>1. Premessa .....</b>	<b>1-1</b>
<b>2. Inquadramento (a cura di UniTS e UniUD) .....</b>	<b>2-1</b>
2.1. La laguna di Marano e Grado.....	2-1
2.2. Origine .....	2-4
2.3. Strumenti conoscitivi .....	2-4
<b>3. Analisi degli aspetti idrodinamici (a cura di UniUD).....</b>	<b>3-1</b>
3.1. Raccolta e organizzazione dei dati .....	3-1
3.1.1. Dati mareografici .....	3-1
3.1.2. Dati anemometrici .....	3-8
3.1.3. Dati cartografici .....	3-14
3.2. Validazione dei dati raccolti .....	3-17
3.2.1. Analisi dei dati mareografici.....	3-17
3.2.2. Analisi dei dati anemometrici.....	3-27
3.3. Descrizione dei modelli numerici.....	3-31
3.3.1. Descrizione del modello idrodinamico.....	3-31
3.3.2. Descrizione del modello morfodinamico .....	3-37
3.3.3. Descrizione del modello spettrale .....	3-39
3.3.4. Descrizione del modello accoppiato idrodinamico/morfodinamico - spettrale .....	3-40
3.4. Modello idrodinamico delle correnti e del moto ondoso .....	3-43
3.4.1. Definizione e quotatura delle mesh idrodinamiche.....	3-43
3.4.2. Individuazione delle classi di scabrezza e calibrazione dei coefficienti di resistenza...3-46	
3.5. Condizioni al contorno di marea e vento .....	3-53
3.6. Simulazioni idrodinamiche .....	3-61
<b>4. Analisi degli aspetti morfologico – evolutivi (a cura di UniTS).....</b>	<b>4-1</b>
4.1. Introduzione.....	4-1
4.2. Strumenti conoscitivi .....	4-4
4.2.1. Carte storiche .....	4-4
4.2.2. Foto aeree .....	4-5
4.2.3. Le carte batimetriche della laguna .....	4-6
4.2.4. Rilievi topo-batimetrici dei litorali .....	4-7
4.2.5. I sedimenti .....	4-8
4.2.6. Il contesto evolutivo: innalzamento del livello del mare .....	4-18



4.3.	Analisi geomorfologica quantitativa della laguna e analisi evolutiva (erosione/accumulo) su base cartografica .....	4-20
4.3.1.	Metodologia di analisi .....	4-20
4.3.2.	L'ipsometria della laguna: confronto evolutivo .....	4-22
4.3.3.	La carta delle differenze .....	4-29
4.4.	Bilancio sedimentario .....	4-43
4.4.1.	Quantificazione del bilancio .....	4-43
4.4.2.	Modello concettuale di bilancio sedimentario .....	4-47
4.5.	Gli elementi morfologici di interesse .....	4-49
4.6.	Banchi e isole barriera .....	4-50
4.6.1.	Dati e metodologia di analisi .....	4-51
4.6.2.	Stato di fatto: distribuzione e morfologia recente .....	4-55
4.6.3.	Banchi: stato di conservazione .....	4-60
4.6.4.	Isole barriera: stato di conservazione .....	4-76
4.7.	Barene .....	4-81
4.7.1.	Dati e metodologia di analisi .....	4-82
4.7.2.	Stato di fatto .....	4-86
4.7.3.	Stato di conservazione .....	4-92
4.8.	Piane tidali .....	4-99
4.8.1.	Dati e metodologia di analisi .....	4-99
4.8.2.	Stato di fatto .....	4-100
4.8.3.	Stato di conservazione .....	4-102
4.9.	Canali .....	4-104
4.9.1.	Dati e metodologia di analisi .....	4-104
4.9.2.	Stato di fatto .....	4-104
4.9.3.	Stato di conservazione .....	4-105
4.10.	Valli da pesca .....	4-107
4.11.	Descrizione geomorfologica della laguna ed evoluzione complessiva .....	4-108
<b>5.</b>	<b>Dinamica dei fondali: aspetti modellistici (a cura di UniUD) .....</b>	<b>5-1</b>
5.1.	Individuazione dei parametri funzionali al trasporto solido .....	5-1
5.2.	Simulazioni di trasporto solido .....	5-9
<b>6.</b>	<b>Linee di indirizzo per la gestione geomorfologica della laguna (a cura di UniTS) .....</b>	<b>6-1</b>
6.1.	Obiettivi generali .....	6-1
6.2.	Principali elementi morfologici della laguna .....	6-1
6.2.1.	Banchi esterni e isole barriera .....	6-2
6.2.2.	Barene .....	6-6



6.2.3.	Piane tidali .....	6-11
6.2.4.	Valli da pesca .....	6-13
6.3.	Indicazioni gestionali per la tutela dell'avifauna .....	6-13
6.3.1.	Analisi di contesto .....	6-13
6.3.2.	Minacce .....	6-14
6.3.3.	Indicazioni gestionali .....	6-15
6.4.	Necessità di ampliamento della base conoscitiva e indicazioni per un piano di monitoraggio permanente .....	6-17
6.4.1.	Banchi e isole barriera .....	6-17
6.4.2.	Barene .....	6-17
6.4.3.	Velme.....	6-18
6.4.4.	Valli da pesca .....	6-18
6.4.5.	Subsidenza.....	6-18
6.4.6.	Monitoraggio.....	6-18
6.4.7.	Banche dati.....	6-19
6.5.	Prime indicazioni per un disciplinare per la movimentazione di sedimenti in laguna .....	6-19
<b>7.</b>	<b>Sintesi delle criticità e proposte di intervento (a cura di UniTS – UniUD) .....</b>	<b>7-1</b>
7.1.	Individuazione delle aree critiche e proposte di intervento .....	7-1
7.2.	Verifica modellistica di una serie concordata di interventi .....	7-5
<b>8.</b>	<b>Conclusioni (a cura di UniTS – UniUD).....</b>	<b>8-1</b>
<b>9.</b>	<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>9-1</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>10-1</b>
<b>Tavola 1.</b>	Carta delle differenze altimetriche 1964-2009 (a cura di UniTS)	
<b>Tavola 2.</b>	Carta degli elementi morfologici della laguna (a cura di UniTS)	
<b>Tavola 3.</b>	Dinamica evolutiva delle barene 1954-2006 (a cura di UniTS - ARPA FVG)	
<b>Tavola 4.</b>	Variazione del fondo media annua (a cura di UniUD)	
<b>Tavola 5.</b>	Carta delle criticità (a cura di UniTS e UniUD)	
<b>Tavola 6.</b>	Variazione del fondo dopo un anno in assenza di protezioni temporanee dei riporti (a cura di UniUD)	
<b>Tavola 7.</b>	Variazione del fondo dopo due anni con parziale consolidamento dei riporti (a cura di UniUD)	
<b>Allegato.</b>	Aree critiche e proposte di intervento (a cura di UniTS e UniUD)	





## 1. Premessa

Con D.G.R. n. 367 del 27 febbraio 2014 la Giunta regionale ha dato avvio alla redazione dello Studio di assetto morfologico ambientale della Laguna di Marano e Grado al fine di attuare gli obiettivi condivisi riguardanti la conservazione dell'ambiente e delle morfologie lagunari, la conservazione della natura e della biodiversità, nonché la sicurezza dei canali navigabili, garantendone la navigabilità.

In particolare il suddetto Studio deve costituire la base di partenza per garantire la pianificazione di interventi mirati e sostenibili e fissare linee di indirizzo al fine di mantenere e migliorare l'equilibrio morfologico, sedimentario e idrodinamico della laguna, riattivando i dinamismi naturali ove carenti e contrastando il degrado indotto dalle forzanti antropiche, che si sommano a quelle naturali, tra cui il cambiamento climatico.

A tal fine in data 04.03.2015 sono stati stipulati due accordi di collaborazione tra la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione centrale infrastrutture, mobilità, pianificazione territoriale, lavori pubblici e edilizia e i due rispettivi Dipartimenti dell'Università di Trieste (UniTS) e Udine (UniUD); nello specifico:

- Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste (DMG)
- Dipartimento di Chimica Fisica e Ambiente (DICFA) dell'Università degli Studi di Udine, dal 1 gennaio 2016 Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura (DPIA).

In sede di accordo operativo, che disciplina la collaborazione reciproca tra le parti impegnate, sono state delineate le attività da svolgersi per la realizzazione del suddetto Studio.

Tali attività, indicate nell'allegato tecnico, si distinguono tra attività comuni al "Gruppo di Lavoro", costituito dai sopracitati Dipartimenti e dal personale della Regione e attività specifiche di competenza dei singoli soggetti.

L'accordo prevedeva una fase preliminare di natura conoscitiva e comune a entrambi i Dipartimenti, volta alla raccolta e organizzazione dei dati utili alla definizione di una corretta base di informazione scientifica della laguna, per la sua caratterizzazione geologica, geomorfologica, idrodinamica e morfodinamica.

Le successive fasi di competenza dell'Università di Trieste si suddividono in:

- analisi del comportamento evolutivo dei banchi esterni e delle isole barriera che bordano la laguna;
- descrizione geomorfologica quantitativa della laguna e analisi evolutiva su base cartografica volta a identificare le zone stabili nel tempo o aventi una tendenza erosiva o deposizionale;
- definizione di un modello concettuale di bilancio sedimentario della laguna, sulla base delle informazioni esistenti e delle attività sperimentali esistenti;
- stesura delle linee di indirizzo per la gestione dei principali elementi morfologici della laguna e la tutela del suo assetto sedimentologico.

Le fasi previste invece dall'accordo a carico dell'Università di Udine si distinguono in:

- modellazione idrodinamica della laguna, finalizzata all'individuazione di aree vulnerabili, perché potenzialmente esposte all'attività erosiva per azione congiunta di correnti di marea e moto ondoso, da intersecare con lo studio morfo-evolutivo della laguna a cura dell'Università di Trieste;
- modellazione morfodinamica della laguna, indirizzata alla valutazione del trasporto dei sedimenti su una scala temporale avente durata compatibile con gli interventi di ripristino, stabilizzazione o rifacimento di strutture a barena e/o velma;
- verifica modellistica di una serie concordata di interventi in termini di erodibilità delle barene ricostruite.



Il presente documento costituisce una sintesi delle attività svolte dai gruppi di ricerca dell'Università di Trieste e Udine conformemente a quanto stabilito sopra.

La relazione si articola in un breve iniziale inquadramento della laguna di Marano e Grado cui seguono i capitoli 3 e 4 che descrivono rispettivamente le attività di stretta competenza di UniUD e UniTS.

Nello specifico, il capitolo 3 presenta una descrizione puntuale di tutti i dati anemometrici, mareografici e cartografici raccolti e loro successiva organizzazione e validazione; vengono presentati sinteticamente i modelli matematici e numerici utilizzati per le successive simulazioni e infine richiamati i passaggi necessari alla definizione del modello idrodinamico, che deve tenere in considerazione e riprodurre l'effetto combinato di correnti di marea e moto ondoso.

Il capitolo 4 ripercorre le fasi seguite allo scopo di determinare lo stato morfologico ed evolutivo dell'intera laguna e dei principali elementi morfologici che la compongono, attraverso una serie di analisi cartografiche e spaziali in ambiente GIS.

In particolare vengono elencati e brevemente descritti i principali strumenti conoscitivi disponibili (cartografia, foto aeree, rilievi topo-batimetrici), i risultati del confronto delle batimetrie dei fondali lagunari nel 1964 e nel 2009, grazie al quale è possibile effettuare un'analisi dell'evoluzione ipsometrica della laguna e individuare le aree stabili nel tempo e quelle soggette a erosione o accumulo e infine i risultati delle analisi compiute sui singoli elementi morfologici di interesse (banchi e isole barriera, barene, piane tidali, canali, valli da pesca).

Nel capitolo 5 viene presentato il modello morfodinamico della laguna, messo a punto da UniUD, che completa l'analisi evolutiva dei fondali lagunari, fornendo le variazioni su un periodo di tempo annuale, a partire dalla configurazione di partenza ricostruita con i dati batimetrici più recenti.

Si pongono così le basi per una corretta formulazione degli ambiti di protezione e delle strategie e priorità gestionali che verranno affrontate al capitolo 6 e dei criteri che consentono di identificare, congiuntamente ai due studi, idrodinamico e morfoevolutivo, le aree lagunari che presentano specifiche problematiche dal punto di vista erosivo, come delineato nel successivo capitolo 7.

Alla localizzazione delle aree è seguita un'indagine sulle tipologie dei possibili provvedimenti attuabili per far fronte alle criticità messe in evidenza e l'applicazione del modello morfodinamico a una serie di interventi di conferimento di materiale di dragaggio, concordata con il Gruppo di Lavoro, per una prima valutazione sulla sostenibilità.



## 2. Inquadramento (a cura di UniUD e UniTS)

### 2.1. La laguna di Marano e Grado

La laguna di Marano e Grado si colloca nell'area Nord Adriatica; compresa tra i delta dei fiumi Isonzo e Tagliamento presenta una superficie pari a 160 km<sup>2</sup>, interamente individuata come ZSC/ZPS (con il codice IT33200379).

Dal punto di vista geografico (Figura 2.1), pur formando un complesso unico, la laguna è suddivisa in due diverse parti: la laguna di Marano (9000 ha) a ovest e la laguna di Grado (7000 ha) a est. Le due parti sono idealmente separate dalla linea di demarcazione posta lungo il confine amministrativo fra la provincia di Udine e quella di Gorizia, che un tempo (tra il 1866 e il 1917) corrispondeva al confine tra Italia e Austria.

L'area lagunare è delimitata verso mare da una serie di isole barriera (da ovest verso est Martignano, Sant'Andrea, Marina di Macia, Marina dei Manzi), parte delle quali fronteggiata verso mare da banchi sabbiosi esterni di poco emergenti (banchi d'Anfora, d'Orio e dei Tratauri), che si estendono per una lunghezza complessiva di 10 km dalla bocca di Buso a quella di Grado. Caratterizzati da grande dinamicità dei processi costieri essi racchiudono piccoli bacini paralagunari e rappresentano elementi morfologici di primaria importanza. Parte di essi è stata identificata dalla regione FVG come "Geosito" e sono inoltre sede importante per la nidificazione di specie avifaunistiche di elevata valenza. La loro evoluzione è stata finora analizzata e descritta in parte da Brambati et al. (1998) per il periodo 1882-1990 e da Fontolan et al. (2007) per il periodo più recente.

Lo scambio mareale tra la laguna e il mare è garantito da sei bocche tidali, sbocco a mare di altrettanti bacini idrografici, all'interno dei quali si snoda una rete di canali: Lignano, Sant'Andrea, Buso, Morgo, Grado e Primero (Figura 2.2).

La conformazione morfologica e batimetrica della laguna è nota dalla *Carta Idrografica del Magistrato alle Acque di Venezia* pubblicata nel 1966 (Dorigo, 1966) e dalla recente *Carta batimetrica della laguna di Marano e Grado* (Triches et al., 2011). Sono inoltre disponibili descrizioni e carte storiche (Dorigo 1965; Brambati, 1969) e per la sola laguna di Grado una carta geomorfologica (Gatto & Marocco, 1992).

Relativamente all'assetto idrodinamico le informazioni sono datate (Dorigo, 1965) e solo parzialmente riviste e aggiornate da Brambati (1996). A quest'ultimo si deve l'aggiornamento (al 1989) dei dati di estensione dei sei bacini idrografici: Lignano (5050 ha), Sant'Andrea (700 ha), Buso (4500 ha), Morgo (297 ha), Grado (3314 ha), Primero (1900 ha).

Le maree che caratterizzano questa parte dell'Adriatico sono semi-diurne con un'altezza media di marea, intesa come differenza tra la media delle alte e la media delle basse maree, di 0.65 m, 1.05 m in periodi di sizigia e 0.22 m in quadratura (Dorigo, 1965). I dati sulla propagazione della marea all'interno del bacino lagunare sono stati finora scarsi e datati. Ferla et al. (2008) hanno recentemente confermato i dati di Dorigo (1965), che mettevano in evidenza ridotti tempi di propagazione della marea, dalle bocche al margine lagunare, con differenze minime tra i rispettivi livelli registrati.

I dati disponibili per la valutazione dei tassi di subsidenza sono a tutt'oggi pochi; inoltre sono riferiti a caposalda collocati sugli argini di conterminazione lagunare, soggetti a sprofondamento strutturale (Marocco & Pessina, 1995) e quindi inadatti per la calibrazione della subsidenza. Una stima della subsidenza regionale sul lungo periodo può essere ricavata grazie ai dati di un sondaggio profondo realizzato a circa 1km di distanza da Marano Lagunare: i valori calcolati corrispondono a 0.49 mm/anno (Antonoli et al., 2009). Le serie mareografiche di Trieste e Grado messe a confronto, per quanto possibile, mostrano una differenza pari a 0.8 mm/anno, che può essere assunta come valore della subsidenza per Grado durante il periodo 1994–2005 (Ferla et al., 2008).





Figura 2.2. Suddivisione della laguna in sei bacini idrografici.

Gli apporti di acque dolci in laguna derivano dai fiumi di risorgiva (Stella, Turgnano, Zellina, Aussa-Corno, Natissa, Tiel), dall'unico fiume proveniente dall'area montana (Cormor) e da 30 impianti idrovori distribuiti sul margine lagunare, che drenano le aree bonificate della bassa pianura friulana. Nel 2009 l'Autorità di Bacino Regionale del Friuli Venezia Giulia ha calcolato l'apporto medio dei fiumi in 81.5 m<sup>3</sup>/s, con il maggior contributo dato dallo Stella (36.1 m<sup>3</sup>/s) e dal Cormor (10.7 m<sup>3</sup>/s). Relativamente al trasporto solido, i dati sono di fatto inesistenti.

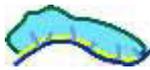
La complessa interazione uomo-ambiente ha portato a una progressiva trasformazione della laguna fin dall'epoca romana limitando sempre più nel tempo i gradi di libertà del sistema e riducendolo a un contesto fortemente condizionato e controllato (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 1976).

In base all'analisi delle mappe storiche IGM disponibili a partire dal 1891 e a quanto riportato da Dorigo (1965) e da Gatto & Marocco (1992) appare evidente come gli interventi antropici in laguna siano stati numerosi e complessi. Essi hanno in primo luogo riguardato la bonifica dei territori perilagunari a partire dai primi anni del 1900, portando alla sottrazione di vaste aree di superficie lagunare. Le azioni di bonifica e di messa in sicurezza idraulica hanno portato alla costruzione di argini di conterminazione lungo tutto il perimetro della laguna (65 km) portati a una quota pari a 3m sul livello medio mare successivamente alla disastrosa alluvione del novembre 1966.

All'interno del bacino la naturale conformazione idrografica è stata modificata dapprima con la costruzione della Litoranea Veneta, complessa rete di canali navigabili costruita durante il periodo 1915-1916. In tempi più recenti (anni '70) vi è stato l'escavo del canale Aussa Mare, dalla bocca di Porto Buso al porto industriale di Porto Nogaro all'interno del fiume Aussa e la costruzione di grandi marine per il diporto nautico e l'escavo dei relativi canali di accesso (Marina Punta Faro sul margine occidentale della bocca di Lignano e Aprilia Marittima sul margine occidentale del bacino di Lignano).

Sempre per garantire la navigabilità e l'accesso alla laguna, le tre principali bocche tidali (Grado, Buso e Lignano) sono state armate attraverso la costruzione di moli guardiani.

La pratica tradizionale della vallicoltura è diffusa in laguna da lungo tempo, attualmente le valli da pesca occupano una superficie pari a 1796 ha, in prevalenza nei bacini di Grado, Mörgo e Primero.



## 2.2. Origine

Nella genesi della laguna si ritrova in parte quella suddivisione geografica che abbiamo finora attribuito solo a motivi amministrativi e geopolitici. Numerosi studi si sono occupati di questo aspetto basandosi su sondaggi (Marocco et al. 1984; Marocco 1988, 1989, 1991) o dati archeologici (Fontana, 2006).

In base a questi studi è possibile attribuire alla laguna di Marano un'origine più antica: i sedimenti lagunari più profondi riscontrati nella sequenza sedimentaria degli attuali fondali lagunari sono infatti stati datati a circa 5000 anni B.P. L'origine della laguna di Grado invece sembra essere ben più recente, ossia di epoca post-romana, originatasi in seguito alle diversioni dell'Isonzo verso est e all'ingressione marina sulla piana alluvionale da esso abbandonata.

Alcuni fattori che hanno fortemente influenzato la formazione della laguna e determinato la sua successiva evoluzione morfologica sono stati evidenziati da Brambati (1996):

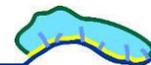
- il progressivo innalzamento del livello marino e i fenomeni di subsidenza che ancor oggi interessano la regione veneto-friulana;
- la variazione del reticolo idrografico superficiale del retroterra, con particolare riferimento al sistema fluviale Torre-Natisone;
- la migrazione della foce del fiume Isonzo da ovest verso est, da Primero a Punta Sdobba;
- il trasporto solido longshore che muove gli apporti sabbiosi isontini da est verso ovest, fino al canale di Lignano;
- il rapido avanzamento in mare del delta del fiume Tagliamento, avvenuto in concomitanza con quello dell'Isonzo.

## 2.3. Strumenti conoscitivi

Come previsto dal Piano di lavoro nella prima fase è stata verificata la consistenza e la disponibilità di dati, studi, lavori, cartografia e foto aeree relativi all'area oggetto di studio. Relativamente agli studi (articoli scientifici, report tecnici, studi di sintesi) è stato realizzato un elenco ragionato di utilizzo dei gruppi di lavoro UniTS e UniUD.

I dati disponibili in forma digitale sono stati raccolti, organizzati, e archiviati. Essi potranno essere resi disponibili per gli utilizzi istituzionali degli Enti coinvolti nello Studio, fatte salve limitazioni dovute a vincoli di copyright, con modalità da concordare con la Regione e il gruppo di lavoro da essa istituito.

Relativamente agli aspetti geologici, geomorfologici, idraulici e morfodinamici collegati ai temi oggetto dello Studio, il materiale raccolto è stato analizzato in chiave critica in modo da sviluppare la necessaria base conoscitiva, che verrà esposta nei capitoli seguenti.



### 3. Analisi degli aspetti idrodinamici (a cura di UniUD)

L'ambiente lagunare è per sua natura contraddistinto e regolato da un complesso e delicato equilibrio di processi di varia origine, naturale e in parte anche antropica. Il carattere spiccatamente dinamico di tale equilibrio è testimoniato dalla particolare morfologia che contraddistingue la laguna: i canali principali che partono dalle bocche con profondità rilevanti, si ramificano in una fitta rete di canali con profondità e dimensioni progressivamente minori, attraverso i quali il flusso di marea viene convogliato fra le barene e all'interno delle estese piane tidali.

L'evoluzione morfologica di un ambiente così eterogeneo ed articolato è condizionato dall'equilibrio dinamico tra l'apporto e il prelievo dei sedimenti solidi, entrambi legati alla capacità della corrente di prendere in carico il materiale e trasportarlo. In un ambiente lagunare tuttavia, si riconosce che la corrente di marea non è l'unico fattore idrodinamico coinvolto nel meccanismo di trasporto solido dei materiali.

Lungo i canali principali, le tensioni al fondo generate dalla sola corrente di marea sono tali da consentire l'innescò del trasporto solido e la successiva movimentazione dei sedimenti; al contrario invece nelle estese piane tidali caratterizzate da bassi fondali e in prossimità delle barene, la velocità della corrente non è più in grado da sola di giustificare la risospensione del sedimento dal fondo, che si dimostra imputabile invece alle forti tensioni oscillanti associate al moto ondoso generato dal vento in laguna.

La compresenza di moto ondoso e corrente di marea, innesca una complessa interazione che induce cambiamenti reciproci nel campo di moto di ciascuno e dunque nella distribuzione delle tensioni al fondo da essi generata.

In relazione alla necessità di individuare il ruolo dei principali fattori idrodinamici che intervengono nell'evoluzione morfologica della laguna di Marano e Grado diventa dunque fondamentale interpretare questa interazione.

In questo capitolo si riassumono le fasi seguite per lo studio idrodinamico della laguna finalizzato all'individuazione di aree suscettibili alla mobilitazione del sedimento e quindi all'erosione e che possono essere considerate strategiche ai fini del nuovo piano morfologico.

Preliminare a questo studio, ma di importanza cruciale, è stata la raccolta di dati utili a quantificare l'azione idrodinamica delle correnti di marea e del moto ondoso.

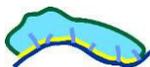
#### 3.1. Raccolta e organizzazione dei dati

I dati raccolti e validati per lo studio idrodinamico della laguna di Marano e Grado sono:

- a) dati mareografici;
- b) dati anemometrici;
- c) dati cartografici.

##### 3.1.1. Dati mareografici

Sono state raccolte le misure di livello registrate sia dai mareografi presenti all'interno della laguna di Marano e Grado che dai mareografi esterni, nello specifico di Venezia Punta della Salute, Trieste e Monfalcone.



In Figura 3.1 è riportato uno schema della collocazione dei mareografi interni, ciascuno identificato da un numero progressivo e dal logo dell'ente di appartenenza, preposto alla gestione e raccolta dei dati e alla manutenzione dello strumento stesso.

Nello specifico gli enti sono tre: Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, ISPRA Venezia e Protezione Civile; complessivamente nell'area lagunare si contano 21 unità mareografiche.

I mareografi gestiti dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia sono complessivamente 12; con riferimento alla numerazione di Figura 3.1, essi vengono identificati in base alla collocazione geografica:

1. Aprilia Marittima;
2. Idrovora Fraida;
3. Bivio Lovato;
4. Lignano Darsena;
5. Tre Canai;
6. Bivio Taglio;
7. Porto Margreth;
8. Faro Porto Buso;
9. Bivio Morgo;
10. Natissa;
11. Sdrettolo;
12. Primero.

I mareografi gestiti dall'ISPRA e facenti parte della Rete Meteo-mareografica della Laguna di Venezia (RMLV) sono collocati a:

13. Lignano Darsena;
14. Marano lagunare;
15. Grado Belvedere;
16. Grado;
17. Primero.

Infine i mareografi gestiti dalla Protezione Civile della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia e facenti parte della rete idrometeorologica regionale sono installati a:

18. Lignano Darsena;
19. Marano Lagunare;
20. Grado belvedere;
21. Grado.

Di seguito si riportano le informazioni ottenute per ciascuno strumento, relativamente a tipologia e periodo di funzionamento.

La Regione FVG ha preso in carico i mareografi dall'ex Autorità di Bacino a partire dal 1 Gennaio 2014. La disponibilità temporale pervenuta copre, dunque, l'intero anno 2014 fino ai primi mesi del 2015 ad esclusione dei mareografi di Aprilia Marittima e Idrovora Fraida che hanno manifestato evidenti problemi di funzionamento; le misure sono prese a intervalli di 10 minuti. Si riporta una sintesi in Figura 3.2.

Dal punto di vista strumentale i mareografi si distinguono in:

- sensori di livello a pressione (OTT modello Orpheus Mini, sigla OM), che restituiscono l'andamento temporale del livello come misura indiretta (campionato a intervalli di 10 min), variando esso linearmente con la pressione idrostatica effettivamente misurata in un pozzetto di calma;
- classici mareografi a galleggiante (OTT modello Thalimedes, sigla TH), che forniscono una misura diretta, essendo la variazione di livello collegata allo spostamento verticale di un elemento galleggiante.

I mareografi regionali si suddividono equamente nelle due tipologie, come evidenziato in Tabella 3.1, dove si riporta per completezza la percentuale di funzionamento di ciascuno strumento nel periodo di cui sono pervenuti i dati misurati.

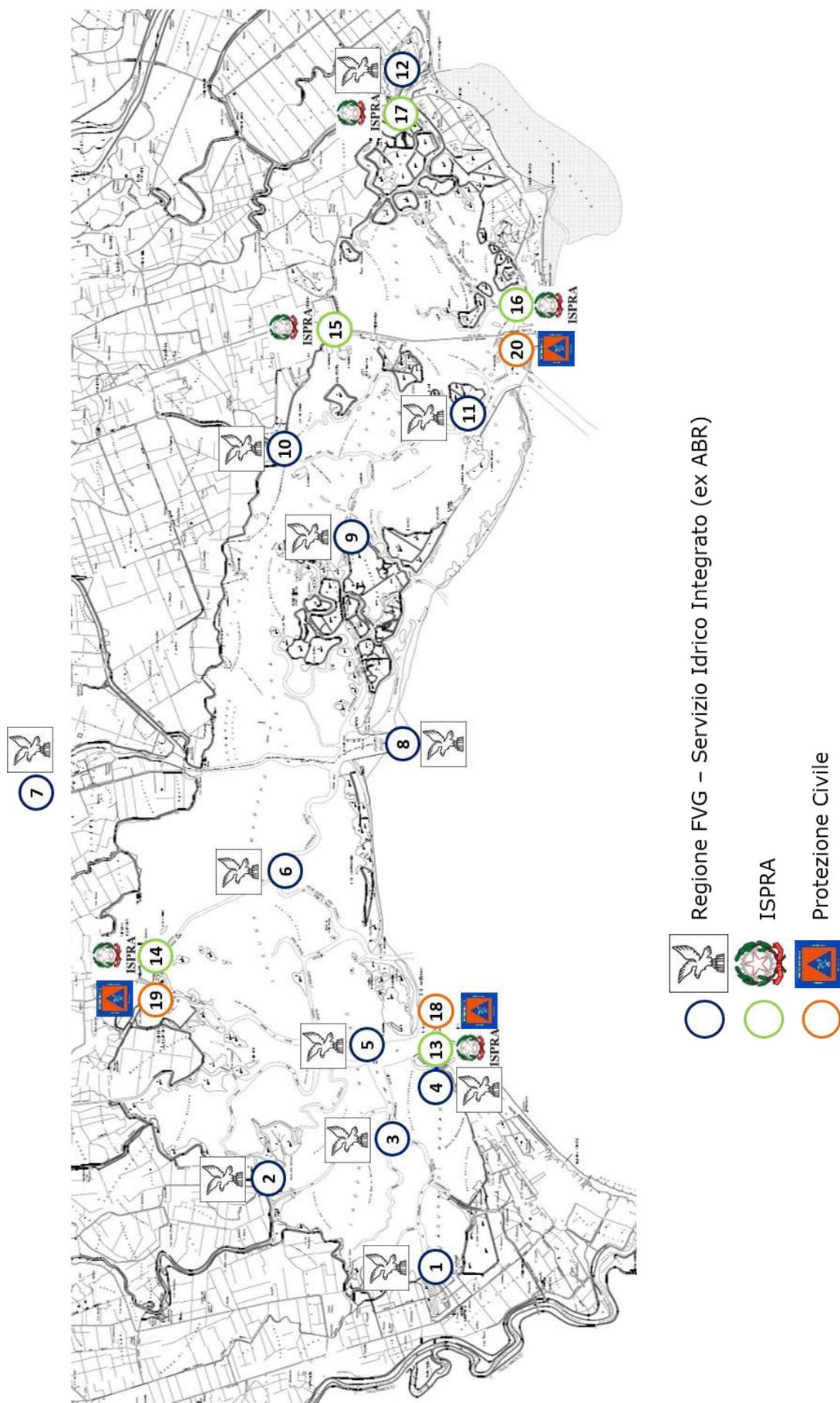
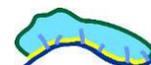


Figura 3.1. Collocazione dei mareografi all'interno della laguna

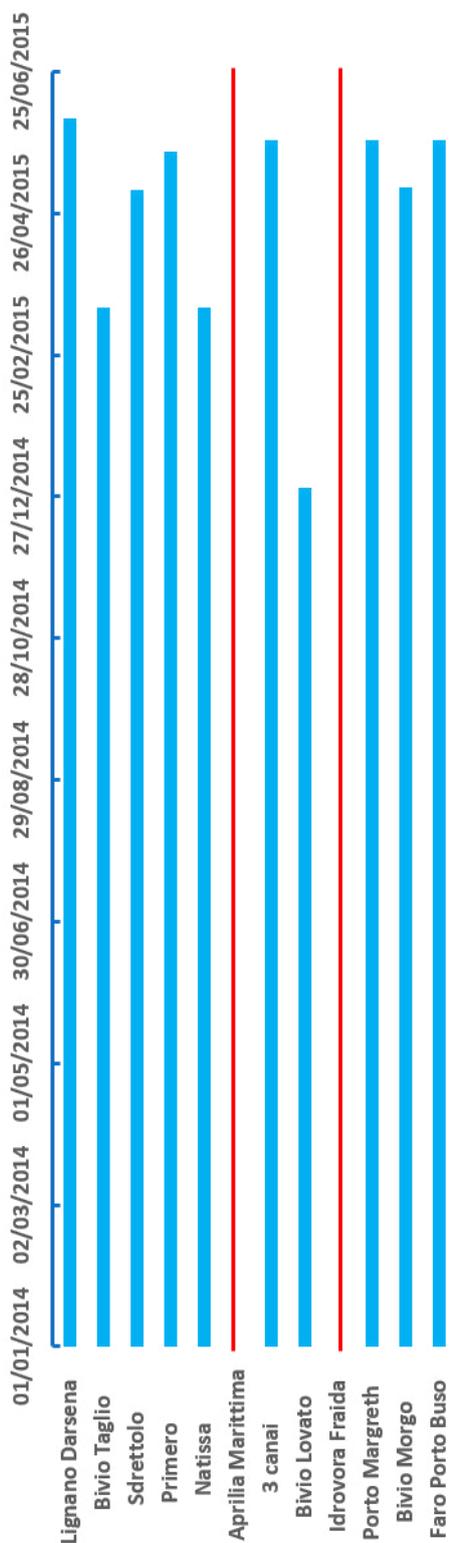
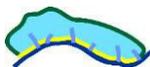
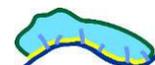


Figura 3.2. Sintesi della disponibilità temporale dei dati pervenuti dalla Regione FVG.

Tabella 3.1. Tipologia di strumento e percentuale di funzionamento dei mareografi regionali.

nome stazione	tipo strumento	data inizio	data fine	periodo (giorni)	periodo effettivo (giorni)	% funzionamento
Lignano Darsena	TH	01/01/2014	05/06/2015	520	305	59
Bivio Taglio	OM	01/01/2014	17/03/2015	440	329	75
Sdrettolo	OM	01/01/2014	06/05/2015	490	297	61
Primero	TH	01/01/2014	22/05/2015	506	162	32
Natissa	TH	01/01/2014	17/03/2015	440	205	47
Aprilia Marittima	TH					
Tre canali	OM	01/01/2014	27/05/2015	511	332	65
Bivio Lovato	OM	01/01/2014	31/12/2014	364	112	31
Idrovora Fraida	TH					
Porto Margreth	OM	01/01/2014	27/05/2015	511	492	96
Bivio Morgo	TH	01/01/2014	07/05/2015	491	389	79
Faro Porto Buso	OM	01/01/2014	27/05/2015	511	492	96

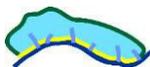


I mareografi gestiti dall'ISPRA collocati all'interno della laguna di Marano e Grado e indicati precedentemente, sono tutti strumenti a galleggiante e contano una serie storica di registrazioni molto lunga.

Le stazioni di Lignano e Marano Lagunare hanno registrato i primi dati nel 1922, quella di Grado nel 1928 e infine Grado Belvedere e Primero nel 1929. In Tabella 3.2 si riporta una sintesi delle principali caratteristiche dei mareografi e in Figura 3.3 la disponibilità dei dati a partire dal 1991.

Tabella 3.2. Sintesi principali caratteristiche dei mareografi gestiti dall'ISPRA

	<b>Lignano</b>			
	Latitudine	Longitudine	Quota piastrina (IGM42)	Strumentazione presente
	45°41'52,29"N	13°08'35,76"E	160 cm	Mareometro a galleggiante. La stazione ospita anche il mareografo gestito dalla Regione FVG.
	<b>Marano Lagunare</b>			
	Latitudine	Longitudine	Quota piastrina (IGM42)	Strumentazione presente
	45°45'43,58"N	13°10'00,65"E	168.5 cm	Mareometro a galleggiante.
	<b>Grado</b>			
	Latitudine	Longitudine	Quota piastrina (IGM42)	Strumentazione presente
	45°40'59,26"N	13°23'00,38"E	157 cm	Mareometro a galleggiante.
	<b>Grado Belvedere</b>			
	Latitudine	Longitudine	Quota piastrina (IGM42)	Strumentazione presente
	45°43'28,56"N	13°23'08,53"E	153 cm	La stazione è stata dismessa nel 2008
	<b>Primero</b>			
	Latitudine	Longitudine	Quota piastrina (IGM42)	Strumentazione presente
	45°42'39,60"N	13°27'39,71"E	229 cm	Mareometro a galleggiante. La stazione ospita anche il mareografo gestito dalla Regione FVG.



Si dispone di meno informazioni riguardo ai mareografi in gestione alla Protezione Civile regionale; i dati pervenuti coprono il periodo che va dal 1 Gennaio 2012 al 31 Marzo 2015 con cadenza di 10 minuti e di ciascuno strumento è indicata la percentuale di funzionamento in Tabella 3.3.

Oltre ai mareografi interni alla laguna è stato inserito anche il mareografo di Monfalcone, esterno all'area in esame.

Tabella 3.3. Funzionamento dei mareografi gestiti dalla Protezione Civile regionale.

nome stazione	periodo (giorni)	periodo registrato (giorni)	% funzionamento
Grado	1185	1155	97
Lignano	1185	1156	98
Marano	1185	1156	98
Monfalcone	1185	1155	97

Contestualmente sono stati raccolti i dati dei due mareografi di Venezia Punta della Salute, appartenente alla rete meteo-mareografica dell'ISPRA e del mareografo di Trieste Molo Sartorio, gestito da ISMAR – CNR. Le principali caratteristiche sono riassunte in Tabella 3.4.

Tabella 3.4. Sintesi delle caratteristiche dei mareografi di Venezia e Trieste.

Venezia Punta della Salute				
	Latitudine	Longitudine	Quota piastrina (ZMPS)	Strumentazione presente
	45°25'50,49"N	12°20'11,97"E	175.50 cm	2 mareometri a galleggiante; mareometro ad ultrasuoni; mareometro a pressione.
Trieste Molo Sartorio				
	Latitudine	Longitudine	Quota piastrina (ZIT)	Strumentazione presente
	45°38'50.1"N	13°45'34.1"E	399.3 cm	4 Mareografi a galleggiante.

La disponibilità delle misure del livello mareografico di Venezia copre il periodo dal 1 Gennaio 1924 fino al 31 Dicembre 2014.

Nello specifico si tratta mediamente di quattro dati giornalieri fino al 25 Maggio 1994, due dati orari a partire da questa data fino al 1 Gennaio 2007 e infine di sei dati orari per l'intera successiva copertura temporale.

Le misure fornite da ISMAR – CNR per il mareografo di Trieste Molo Sartorio sono orarie e coprono il periodo compreso tra il 1 Gennaio 1939 e il 31 Dicembre 2014.

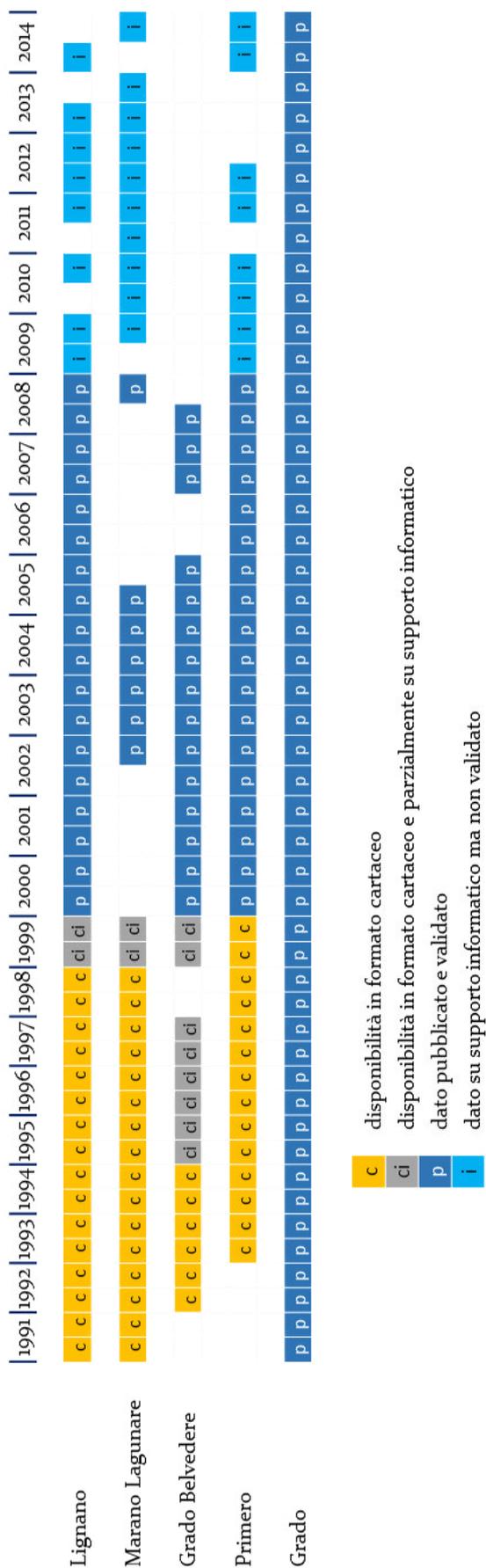
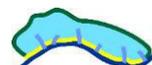
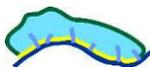


Figura 3.3. Sintesi della disponibilità temporale delle misure mareografiche gestite dall'ISPRA a partire dal 1991.



### 3.1.2. Dati anemometrici

Sono presenti, nell'area lagunare, diverse stazioni anemometriche per il rilievo dei dati di vento in termini di velocità e direzione di provenienza.

In Figura 3.4 è sintetizzata la localizzazione delle principali stazioni i cui dati sono condivisi tra più enti, nello specifico Protezione Civile regionale, ISPRA e OSMER dell'ARPA FVG:

- 1 Lignano;
- 2 Lignano Darsena;
- 3 Grado;
- 4 Grado Mare;
- 5 Fossalon di Grado.

In Tabella 3.5 si riportano le coordinate delle stazioni, alcune osservazioni sul sito e la valutazione sulla rappresentatività anemometrica della misura, tratte dal rapporto tecnico a cura dell'OSMER ARPA FVG. La copertura temporale dei dati reperiti, di cui una sintesi in Figura 3.5, parte dal 1995 per la stazione di Fossalon di Grado, dal 1998 per Grado, dal 2000 per Lignano Darsena e infine dal 2007 per Lignano.

Le misure rilevate dall'anemometro di Grado Mare sono considerate poco attendibili dallo stesso OSMER, mentre la collocazione dell'anemometro a Lignano Sabbiadoro è tale da risentire della presenza degli edifici e alterare significativamente lo strato limite del vento e conseguentemente il valore della velocità.

I dati pervenuti dalle stazioni di Lignano Darsena e Fossalon di Grado, forniti da OSMER, corrispondono a:

- direzione media di provenienza del vento a 10 m slm riferita agli ultimi 10 min/ora;
- velocità media del vento a 10 m slm riferita agli ultimi 10 min/ora;
- velocità media oraria del vento a 10 m slm.

I dati dell'anemometro di Grado, forniti da ISPRA, sono campionati ogni trenta minuti eccezione fatta per il periodo compreso tra il 1 Gennaio 1999 e il 5 Agosto 2003, nel quale direzione e velocità sono mediate su quindici minuti.

Sono stati raccolti anche i dati di vento misurati in alcune stazioni anemometriche presenti nell'Alto Adriatico, di cui una schematizzazione in Figura 3.6.

Nello specifico si tratta delle stazioni di:

- Venezia Lido Diga Sud,
- Piattaforma Acqua Alta,

di cui i dati sono stati forniti da ISPRA;

- Monfalcone Mare,
- Trieste Istituto Nautico,

di cui i dati sono stati forniti dal Servizio idrico integrato della Regione FVG;

- Boa Lignano,
- Boa Grado,
- Boa Isonzo,

di cui i dati sono stati forniti dalla Protezione Civile della Regione FVG.

Per ottenere una maggiore copertura delle misure anemometriche sul territorio lagunare e quindi con l'intento di caratterizzare meglio la distribuzione dei venti, sono stati messi a disposizione dall'ARPA di Palmanova, i dati di vento orari ricostruiti mediante modellazione numerica, in alcuni punti accuratamente scelti all'interno e all'esterno della laguna.

Il periodo simulato è compreso tra il 1 Gennaio 2000 e il 31 Dicembre 2014 e la collocazione dei punti interni alla laguna è schematizzata in Figura 3.7.

Esternamente al perimetro lagunare, invece, essi sono stati presi coincidenti con le coordinate delle stazioni appartenenti al bacino dell'Alto Adriatico e di cui si sono reperiti i dati. Le stazioni sono identificate in Figura 3.6.

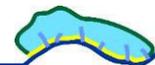


Tabella 3.5. Sintesi delle caratteristiche degli anemometri presenti nell'area lagunare.

<b>Lignano</b>		
Coord EST (GAUSS BOAGA)	2375760	
Coord NORD (GAUSS BOAGA)	5062620	
<u>Osservazioni sul sito:</u> stazione sopra edificio e in alto. <u>Rappresentatività della misura anemometrica:</u> locale (1 - 10 km)		
<b>Lignano Porto</b>		
Coord EST (GAUSS BOAGA)	2375760	
Coord NORD (GAUSS BOAGA)	5062620	
<u>Osservazioni sul sito:</u> stazione di costa sul molo. <u>Rappresentatività della misura anemometrica:</u> ampia (> 10 km)		
<b>Fossalon di Grado</b>		
Coord EST (GAUSS BOAGA)	2400060	
Coord NORD (GAUSS BOAGA)	5063533	
<u>Rappresentatività della misura anemometrica:</u> ampia (> 10 km)		
<b>Grado Meteo</b>		
Coord EST (GAUSS BOAGA)	2393321	
Coord NORD (GAUSS BOAGA)	5059842	
<u>Osservazioni sul sito:</u> stazione di costa sul molo. <u>Rappresentatività della misura anemometrica:</u> ampia (> 10 km)		
<b>Grado Mare</b>		
Coord EST (GAUSS BOAGA)	2395113	
Coord NORD (GAUSS BOAGA)	5058807	
<u>Osservazioni sul sito:</u> stazione su briccola tra la costa e il mare aperto. <u>Rappresentatività della misura anemometrica:</u> ampia (> 10 km)		

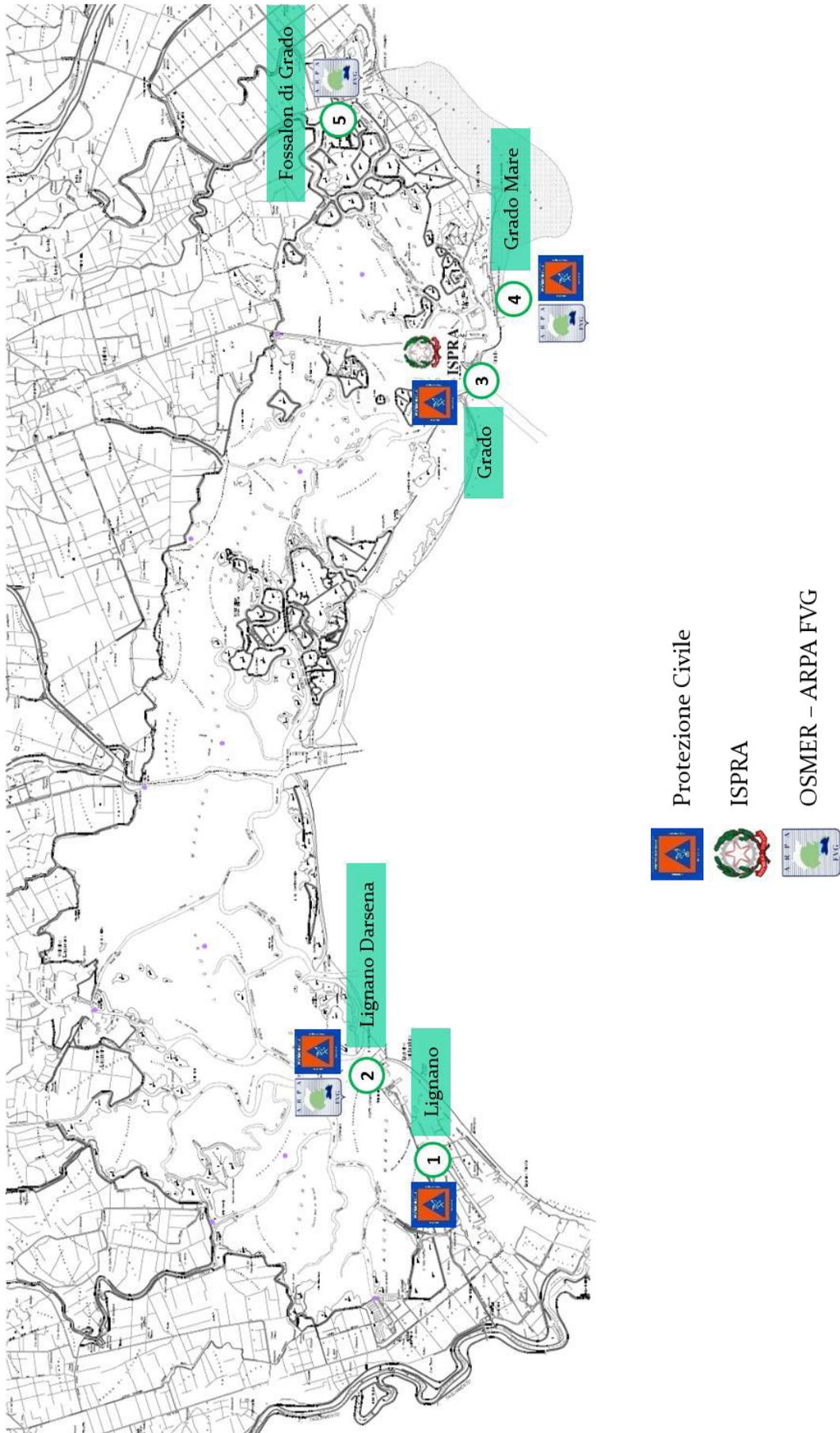
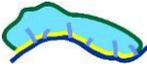


Figura 3.4. Collocazione degli anemometri interni alla laguna

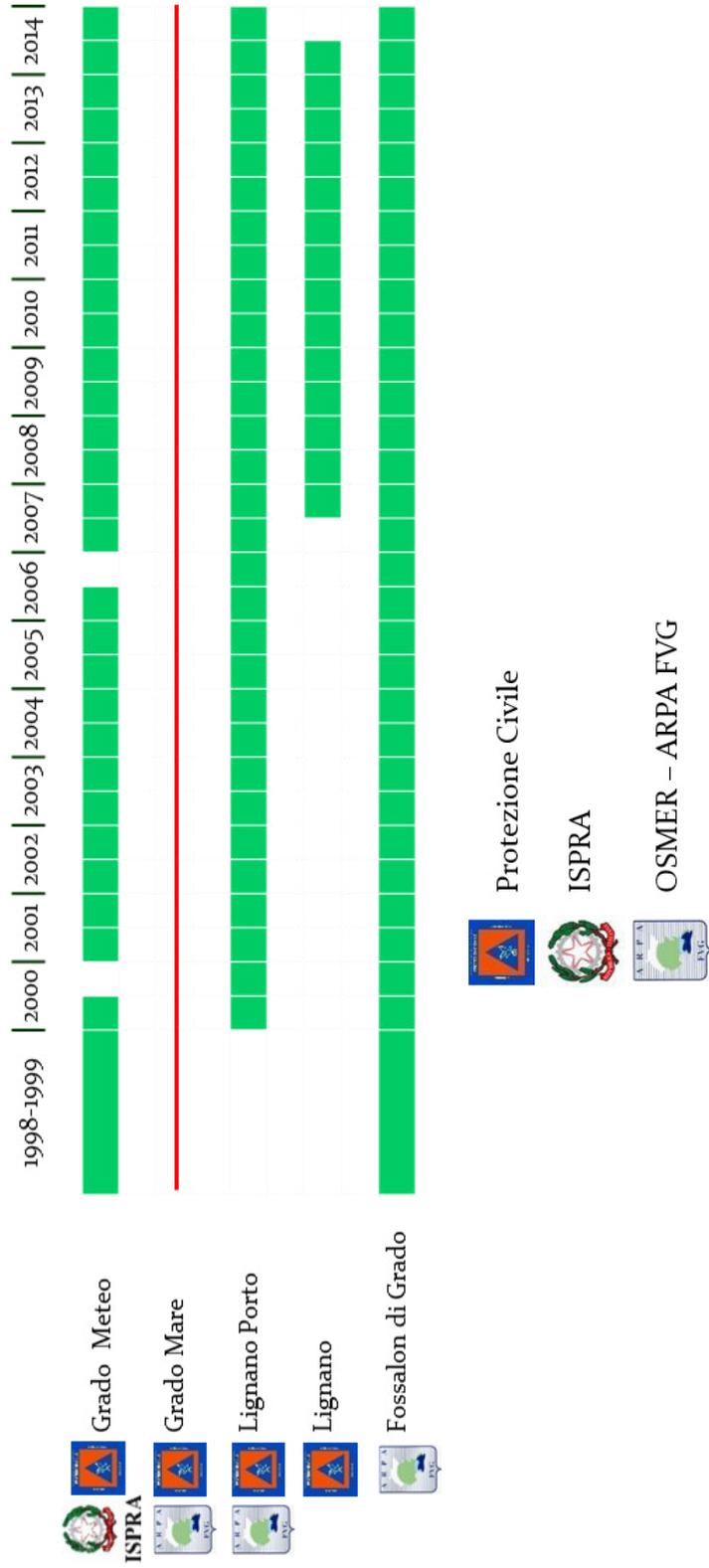
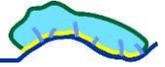


Figura 3.5. Disponibilità temporale degli anemometri presenti internamente alla laguna.

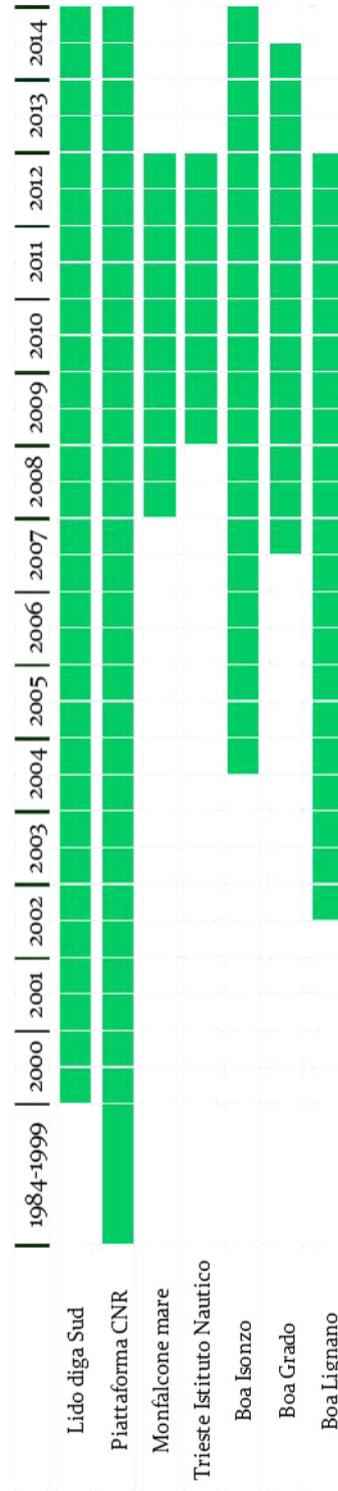
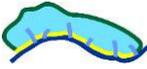


Figura 3.6. Collocazione degli anemometri presenti in Alto Adriatico e disponibilità temporale.

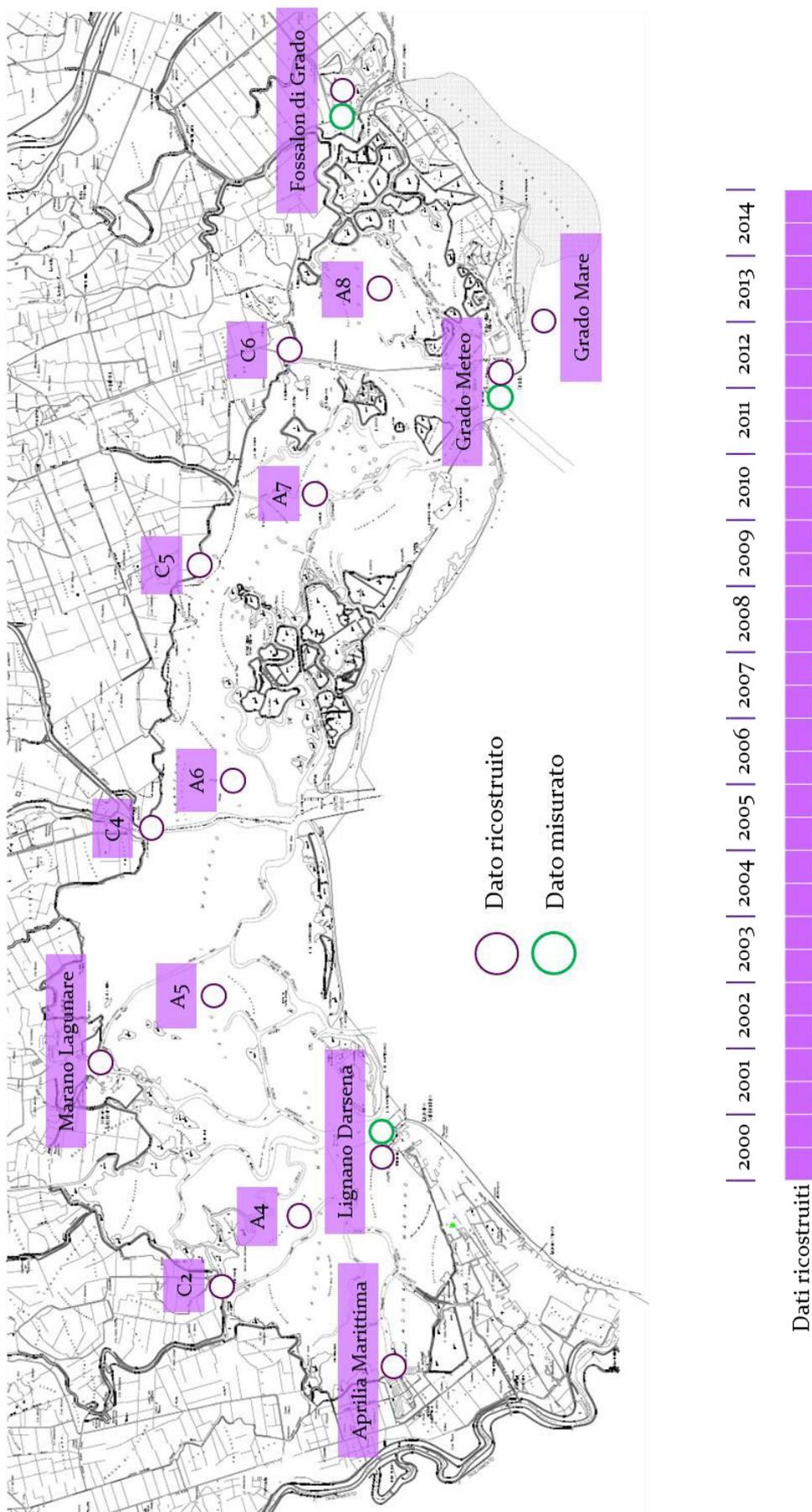
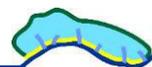
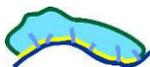


Figura 3.7. Collocazione dei dati di vento ricostruiti mediante modellazione, internamente al territorio lagunare e disponibilità temporale.



### 3.1.3. Dati cartografici

I dati cartografici ritenuti utili e quindi reperiti per lo svolgimento dello studio sono:

- cartografia numerica regionale in scala 1:5000, di cui si riporta il quadro di unione in Figura 3.8;
- carta batimetrica della laguna di Marano e Grado fornita dalla Regione FVG (Figura 3.9);
- dati batimetrici dell'Alto Adriatico forniti da Arpa FVG;
- dati batimetrici delle bocche di Lignano, Sant'Andrea e Grado rilevati dal gruppo di ricerca dell'Università di Trieste di cui il responsabile scientifico è il prof. Fontolan;
- dati batimetrici della bocca di Porto Buso forniti dalla Regione FVG;
- dati batimetrici dei canali Tajada e Coron e la sezione tipo del canale di Barbana, forniti dalla Regione FVG;
- mappa di distribuzione delle fanerogame (Boscutti, Francescato, Casolo, 2012) di cui l'immagine in Figura 3.10;
- mappa di conterminazione delle aree destinate alla pesca fornita dalla Regione FVG (Figura 3.11);
- aerofotogrammi e ortofoto reperiti dal sito della Regione FVG e dal sito del Ministero dell'Ambiente;
- immagini satellitari finalizzate ad un uso multimediale.

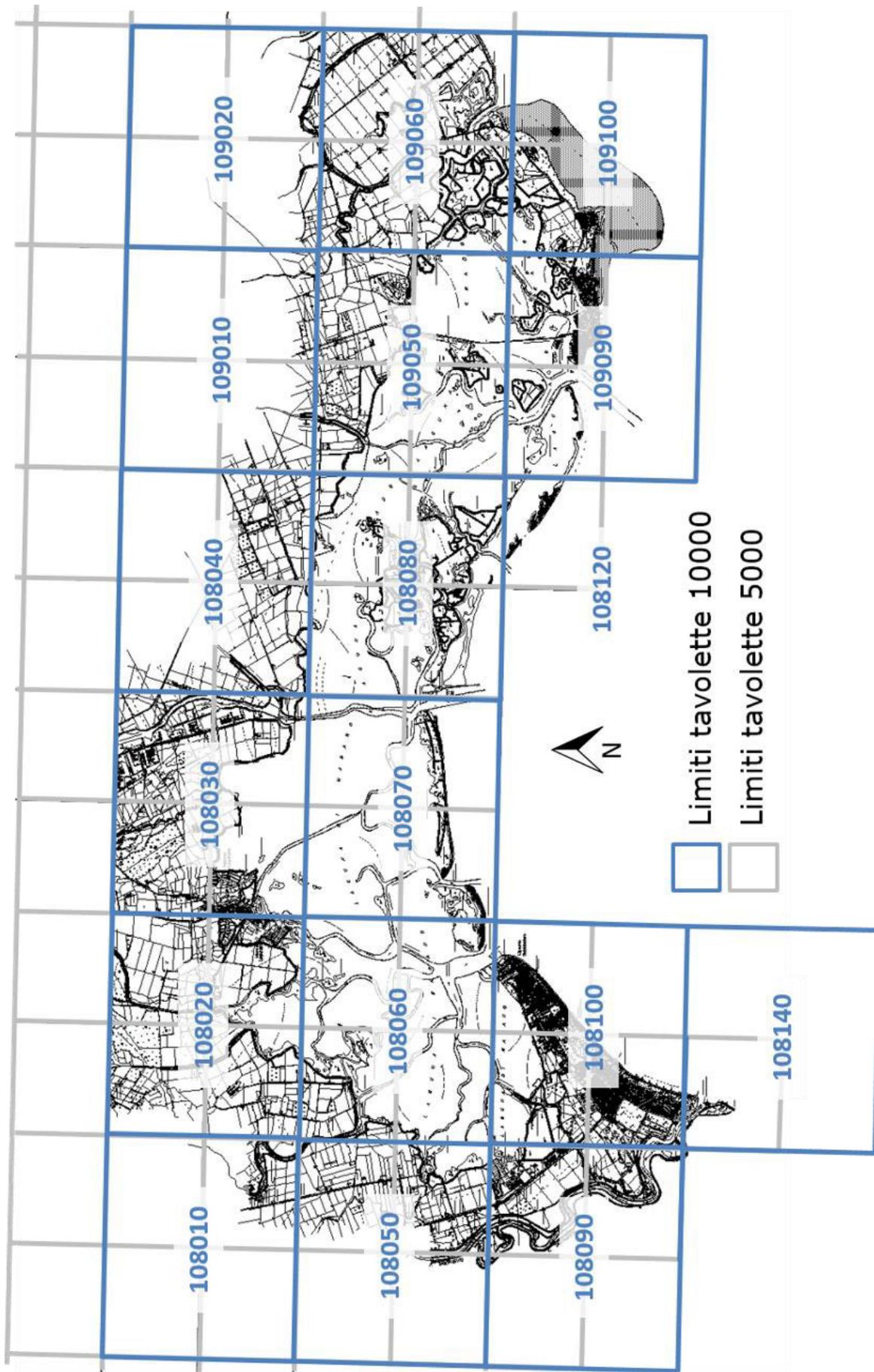
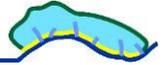


Figura 3.8. Quadro di unione CRN 25000 e CNR 5000 dell'area lagunare.

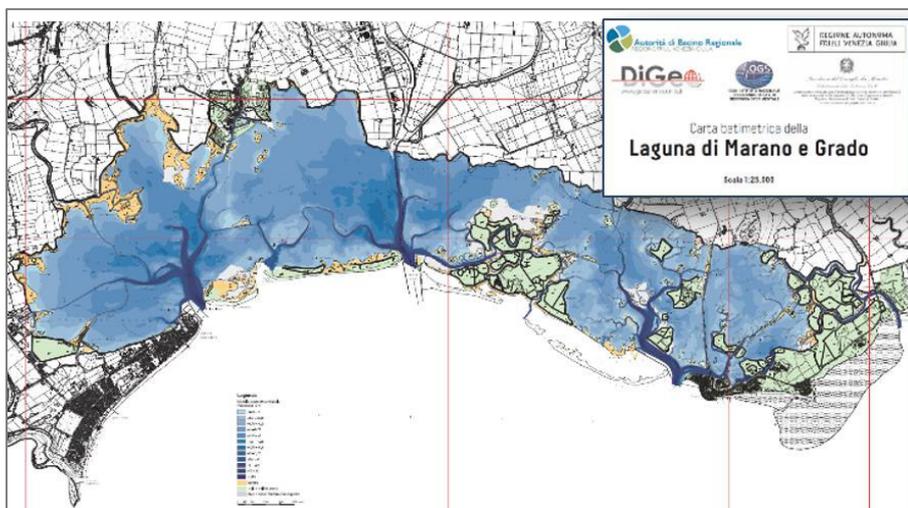
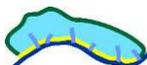


Figura 3.9. Carta Batimetrica della laguna di Marano e Grado (Triches et al., 2011).

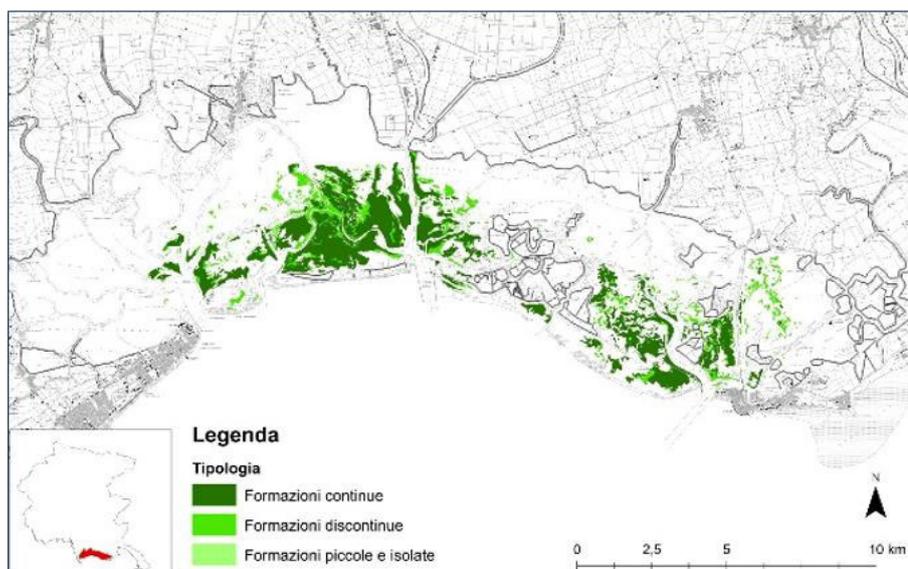


Figura 3.10. Mappa di distribuzione delle fanerogame (Boscutti et. al, 2012).

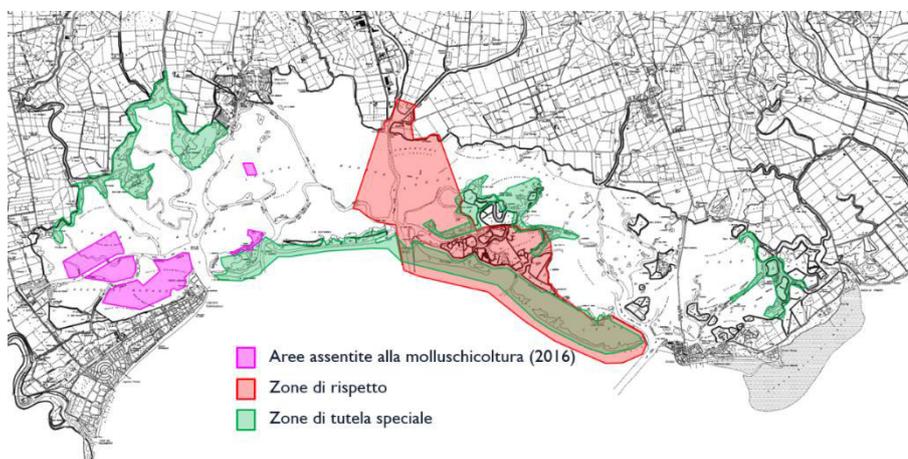
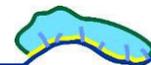


Figura 3.11. Mappa di conterminazione delle aree destinate alla pesca e delle zone di rispetto (Regione FVG).



## 3.2. Validazione dei dati raccolti

In questa fase i dati raccolti sono stati analizzati in chiave critica per definire le caratteristiche di carico, “forzanti” dal punto di vista ingegneristico, necessarie per lo studio degli aspetti idrodinamici del sistema lagunare.

### 3.2.1. Analisi dei dati mareografici

L’analisi dei dati mareografici è stata condotta, in un primo momento, separatamente per i tre gruppi di mareografi appartenenti allo stesso ente gestore, sviluppandosi come segue:

1. validazione delle singole misure;
2. calcolo dei livelli medi annuali registrati dai mareografi;
3. confronto dei livelli medi.

Quindi si è proceduto all’ulteriore confronto dei livelli medi annui tra mareografi distinti, ma installati nello stesso sito, per gli anni di cui è riscontrabile la sovrapposizione dei dati registrati.

Di seguito si riporta la sintesi ottenuta per i mareografi gestiti dalla Regione FVG. L’analisi è stata limitata all’unico anno completo di registrazione disponibile, ossia il 2014, per un totale di 321969 dati pervenuti; è stata definita la percentuale di funzionamento per ciascun mareografo, sulla base dei dati esistenti rispetto al numero atteso delle misurazioni.

I mareografi di Aprilia Marittima e Idrovora Fraida sono stati esclusi dall’analisi per manifesti problemi di funzionamento degli strumenti.

Sono stati calcolati il livello medio e lo scarto quadratico medio secondo le definizioni:

$$\bar{\eta} = \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\eta} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^2} \quad (3.2)$$

essendo  $\eta_i$  la singola registrazione e  $N$  il numero di dati registrati da ciascun mareografo.

Si è stabilita una procedura di validazione sulla base dell’appartenenza del dato misurato  $\eta_i$  ad uno specifico intervallo, definito a partire dal valore medio (3.1) e dalla deviazione standard (3.2).

Per il teorema del limite centrale, infatti, si può affermare che la somma di un grande numero di variabili aleatorie indipendenti e dotate della stessa distribuzione è approssimativamente normale, indipendentemente dalla distribuzione soggiacente. Questo implica che, se un campione è grande, allora la distribuzione della somma delle  $N$  variabili aleatorie può essere assunta gaussiana.

Preso dunque per i livelli  $\eta_i$  tale distribuzione, si dimostra che la probabilità che ciascun valore atteso appartenga all’intervallo  $(\bar{\eta} - 3\sigma_{\eta}; \bar{\eta} + 3\sigma_{\eta})$  è pari al 99.7%.

Sulla base di queste considerazioni, è stato definito valido ciascun livello misurato che rientrasse nei limiti dell’intervallo così precisato.

In Tabella 3.6 si riporta la sintesi sui mareografi in carico alla Regione FVG, specificando la percentuale di funzionamento e la percentuale dei dati validi, sia del singolo strumento che sul numero complessivo di misure elaborate.

La percentuale di dati validi è complessivamente molto alta, tuttavia lo stesso non si può confermare per la percentuale di funzionamento, molto variabile da strumento a strumento.

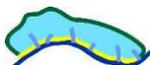


Tabella 3.6. Sintesi della validazione dei dati registrati dai mareografi gestiti dalla Regione FVG.

2014					
Mareografo	Dati esistenti	% Funzionamento	Dati validi	%Dati validi	media (m)
Bivio Morgo	37843	72.00	37839	99.99	0.15543
Bivio Taglio	36437	69.32	36394	99.88	0.08809
Lignano Darsena	29433	56.00	29433	100.00	0.11364
Bivio Lovato	16133	30.69	16132	99.99	0.20110
Natissa	18719	35.61	18719	100.00	0.19519
Faro Porto Buso	49723	94.60	49722	100.00	0.13973
Porto Margreth	49726	94.61	49725	100.00	0.29895
Primero	15173	28.87	15173	100.00	0.16209
Sdrettolo	31921	60.73	31915	99.98	0.17801
Tre canai	36861	70.13	36855	99.98	0.20637
<b>TOTALE DATI</b>	<b>321969</b>	<b>61.26</b>	<b>321907</b>	<b>99.98</b>	<b>-</b>

Nell'ultima colonna della Tabella 3.6 è precisato il livello medio annuale riferito allo zero IGM 42, calcolato sui dati validati.

La stessa media, convertita in cm, è stata riportata per una maggiore comprensione in forma grafica, in Figura 3.12, con un confronto fatto per gruppi di strumenti. Per ciascun mareografo è stata trascritta, in parentesi, la percentuale di funzionamento.

Il mareografo di Porto Margreth è stato escluso in questa analisi, essendo esterno all'area di studio.

Si osserva che il livello medio registrato dai diversi strumenti può risultare sensibilmente diverso, anche di 10 - 12 cm.

Nello specifico si riscontra una netta discrepanza su Lignano che ha fornito dati utili solo per il 56% del 2014 e la cui media è sensibilmente diversa dai due mareografi più vicini.

Il mareografo di Porto Buso è quello con maggiore copertura nel funzionamento, ma restituisce un valor medio più basso di circa 6 cm rispetto a Bivio Lovato e Tre canai.

L'ultimo gruppo di strumenti della Regione FVG, dislocati in laguna di Grado e comprendente i mareografi di Bivio Morgo, Natissa, Sdrettolo e Primero, sembra mostrare una maggiore coerenza, nonostante abbiano registrato percentuali di funzionamento tra le più basse.

Analogo procedimento di validazione è stato effettuato per i 3284385 dati reperiti dai mareografi dell'ISPRA, di cui si riporta una sintesi in Tabella 3.7.

I quasi 3.3 milioni di dati analizzati appartengono tutti alla categoria di dati informatizzati, alcuni validati dallo stesso ente gestore e quindi pubblicati sul sito, altri ancora grezzi. Come si può osservare dai dati riportati in Tabella 3.7, la percentuale di funzionamento è molto buona, eccezione fatta per i mareografi di Marano Lagunare e Grado Belvedere, quest'ultimo dismesso dal 2008.

In Figura 3.13 si riportano i due grafici che mostrano l'andamento del livello medio annuo calcolato per ciascuno strumento, separatamente nei due periodi, rispettivamente il primo dal 2000 al 2009 e il secondo dal 2010 al 2014. Lo zero di riferimento dei livelli medi è sempre IGM 42.

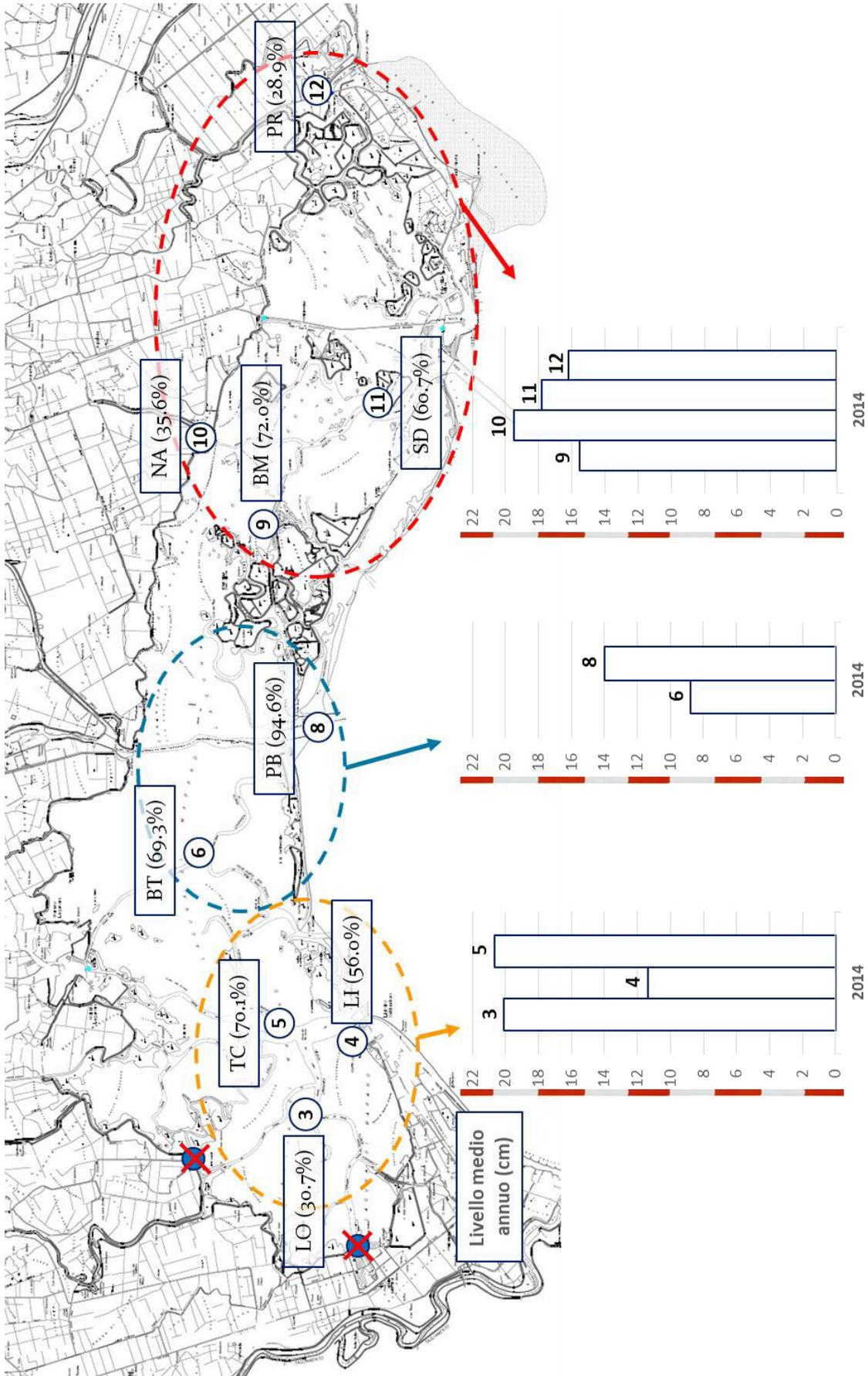
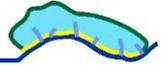


Figura 3.12. Confronto dei livelli medi dei mareografi gestiti dalla Regione FVG per l'anno 2014; in parentesi, accanto alla sigla del mareografo è riportata la percentuale di funzionamento dello strumento.

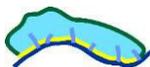


Tabella 3.7. Sintesi della validazione dei dati registrati dai mareografi gestiti dall'ISPRA.

Mareografo	Anni	Dati esistenti	%Dati esistenti	Dati validi	%Dati validi
Lignano	2000 - 2014	679024	86.06	677805	99.82
Marano Lagunare	2000 - 2014	354717	44.96	354109	99.83
Grado	1991 - 2014	1235854	97.90	1233928	99.84
Grado Belvedere	2000 - 2014	352785	74.51	352211	99.84
Primero	2000 - 2014	662005	83.91	660882	99.83
<b>TOTALE DATI</b>		<b>3284385</b>	<b>80.05</b>	<b>3278935</b>	<b>99.83</b>

Si osserva la buona corrispondenza tra i valori calcolati per Venezia e Grado, praticamente sovrapposti. In generale tutti gli strumenti mostrano un andamento fra loro confrontabile e con differenze accettabili fino al 2010. Al contrario, nel periodo successivo si nota una disparità molto forte.

Lignano registra con percentuali basse, mediamente al di sotto del 50%, tra il 2010 e il 2014. In particolare nel 2013 il livello medio corrisponde a -86 cm. Il livello medio registrato a Marano segue l'andamento di Grado ma risulta mediamente più alto rispetto a quest'ultimo di circa 7 - 8 cm. Primero evidenzia un andamento decisamente più irregolare.

Sulla base di queste considerazioni si è provveduto a correggere i dati di Lignano, in termini di livello medio annuo sulla base della media degli scarti sui dati buoni pregressi (periodo 2000 - 2009), come riportato in Figura 3.14.

La procedura di validazione è stata applicata anche ai dati registrati dai mareografi della Protezione Civile regionale. Si riporta la sintesi, analoga alle precedenti, in Tabella 3.8.

Tabella 3.8. Sintesi della validazione dei dati registrati dai mareografi gestiti dalla Protezione Civile.

Mareografo	Anni	Dati esistenti	%Dati esistenti	Dati validi	%Dati validi
Grado	2012 - 2015	166390	97.43	165676	99.57
Lignano	2012 - 2015	166464	97.47	164637	98.90
Marano Lagunare	2012 - 2015	166464	97.47	165069	99.16
Monfalcone	2012 - 2015	166463	97.47	165531	99.44
<b>TOTALE DATI</b>	<b>2012 - 2015</b>	<b>665781</b>	<b>97.46</b>	<b>660913</b>	<b>99.27</b>

In ultima analisi sui dati di marea, è stato fatto un confronto incrociato nelle stazioni in cui risiedono più mareografi: Lignano, Marano Lagunare, Grado e Primero (Figura 3.15).

Si evidenzia in generale una anormale discordanza dei livelli medi.

Su Lignano, in particolare, si nota una discrepanza molto forte tra il livello medio registrato dal mareografo dell'ISPRA, corretto attraverso il procedimento di cui sopra e il livello medio calcolato sui dati della Protezione Civile.

Nello specifico, per l'anno 2014 in cui si dispone anche del livello medio registrato dal mareografo in carico alla Regione, si riscontra solo un parziale accordo tra quest'ultimo e il dato ISPRA.

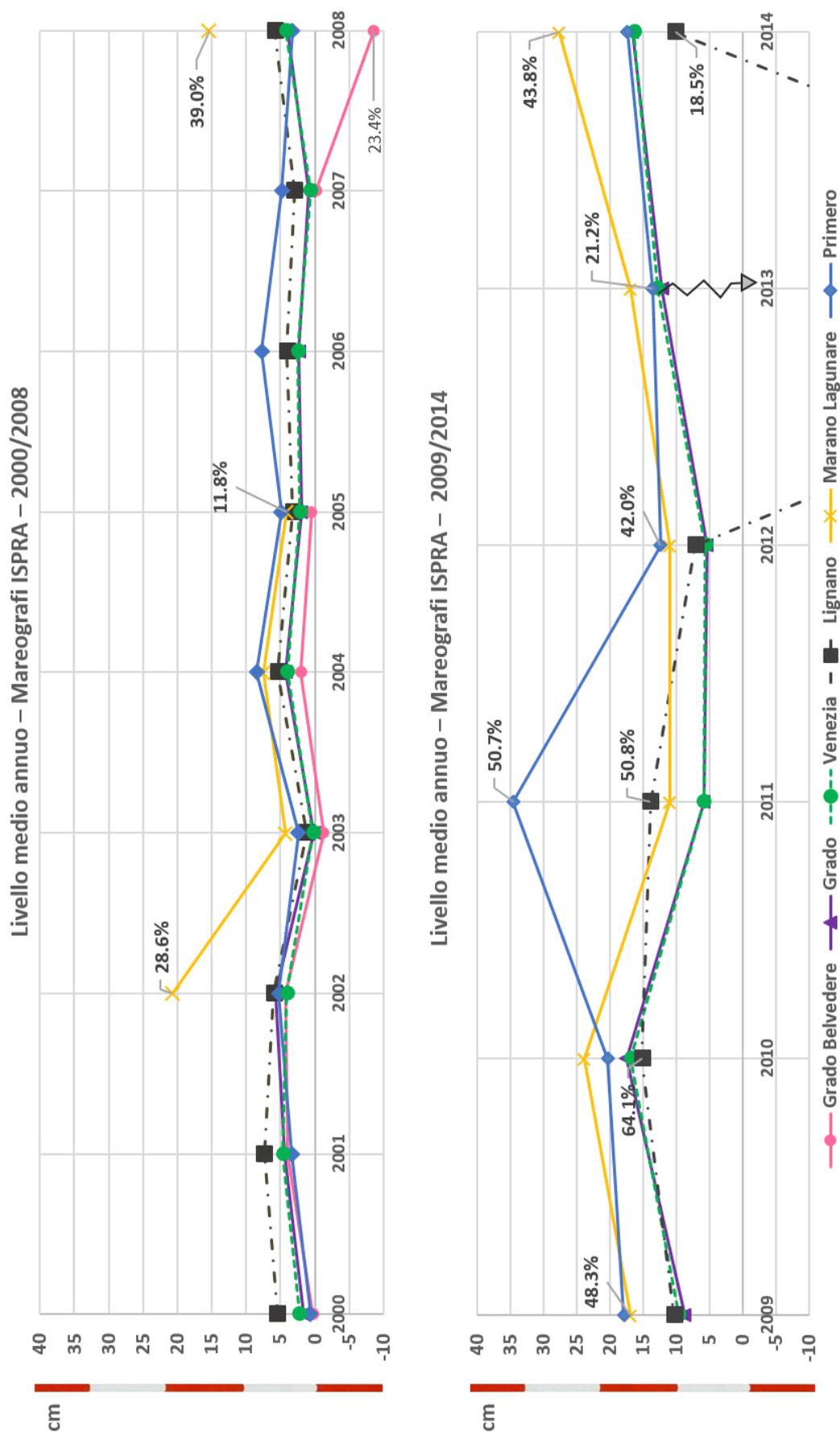
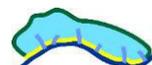


Figura 3.13. Confronto dei livelli medi dei mareografi gestiti da ISPRA; sono riportate le percentuali di funzionamento inferiori al 66%.

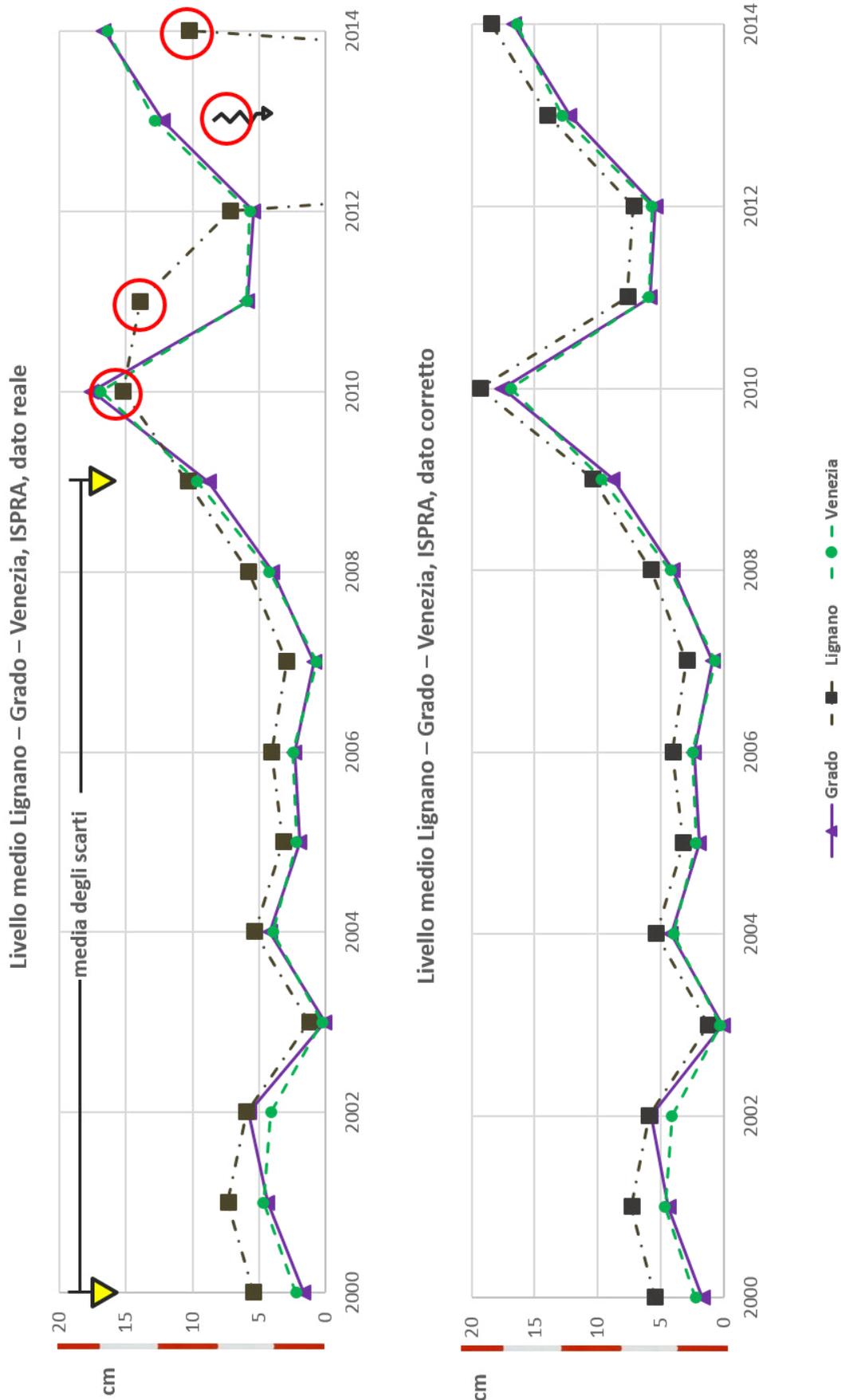
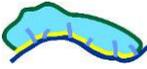


Figura 3.14. Correzione dei livelli medi di Lignano per gli anni 2010, 2011, 2013 e 2014.

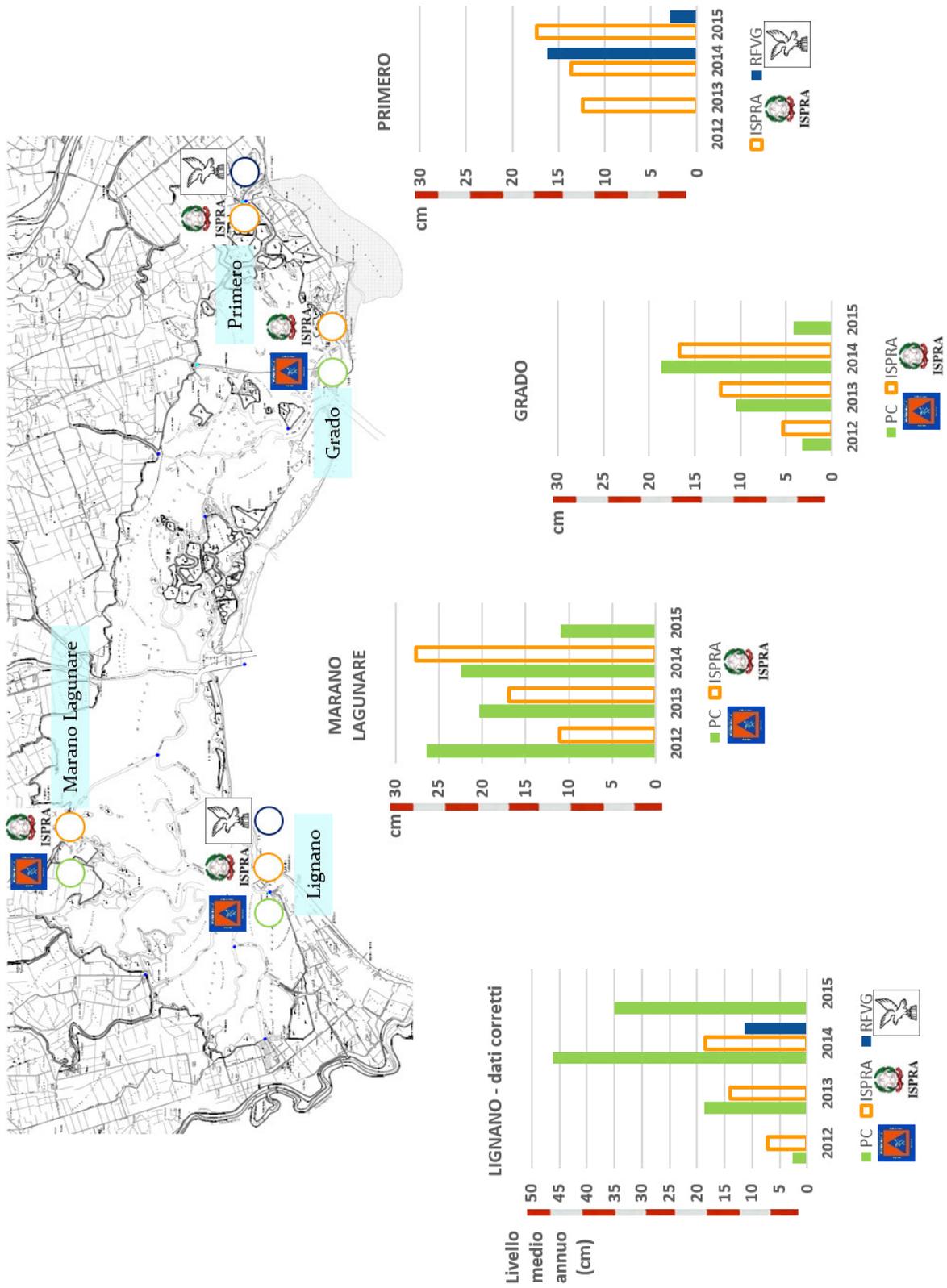
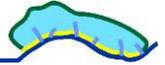
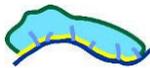


Figura 3.15. Confronto incrociato dei livelli medi registrati da mareografi diversi per gli anni di sovrapposizione dei dati.



Si deve tenere in considerazione che, per l'anno in questione, la percentuale di funzionamento dello strumento è inferiore al 20% per il mareografo ISPRA e inferiore al 60% per il mareografo RFGV, che sottostima il livello medio.

Su Marano si registra una buona corrispondenza unicamente per l'anno 2013, mentre per i restanti si trovano differenze di 10 - 15 cm. Per i mareografi di Grado si rileva una buona corrispondenza confermata anche su Primero per l'anno 2014.

Questa analisi sottolinea la difficoltà di definire dei livelli di riferimento coerenti, nonostante l'importante dispiegamento di strumenti utilizzati per il monitoraggio.

Un ulteriore parametro considerato per la verifica dei dati mareografici, oltre al livello medio, è il ritardo temporale o sfasamento fra i segnali registrati da mareografi collocati in punti diversi, sia esternamente che internamente alla laguna. Una procedura analitica individuata a tale scopo, di cui si riporta una sintesi esemplificativa in Figura 3.16, si basa su un'analisi di correlazione tra coppie di mareografi, che consiste nel calcolare il relativo coefficiente di correlazione.

In generale quest'ultimo, date due variabili statistiche  $X$  e  $Y$ , è definito dal rapporto:

$$C_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_j (X_j - \bar{X})^2 \sum_k (Y_k - \bar{Y})^2}} \quad (3.3)$$

dove al numeratore  $\sigma_{XY}$  è la covarianza e il denominatore è il prodotto delle rispettive deviazioni standard. L'analisi di correlazione viene sintetizzata in grafici analoghi a quello riportato in Figura 3.17, ottenuti plottando i livelli misurati nei medesimi istanti dagli strumenti presi in esame.

Riprendendo un risultato derivante dalla teoria dei segnali, il ritardo fra le registrazioni può essere determinato attraverso due grandezze che sintetizzano la nuvola di punti sul grafico di correlazione, indicate in Figura 3.17 con le lettere "A" e "B".

Per una verifica a posteriori dei risultati ottenuti mediante approccio analitico, gli sfasamenti temporali sono stati misurati a campione sui segnali registrati e confrontati con i valori determinati analiticamente. L'analisi è stata estesa sia ai mareografi esterni alla laguna che interni alla stessa (Figura 3.16).

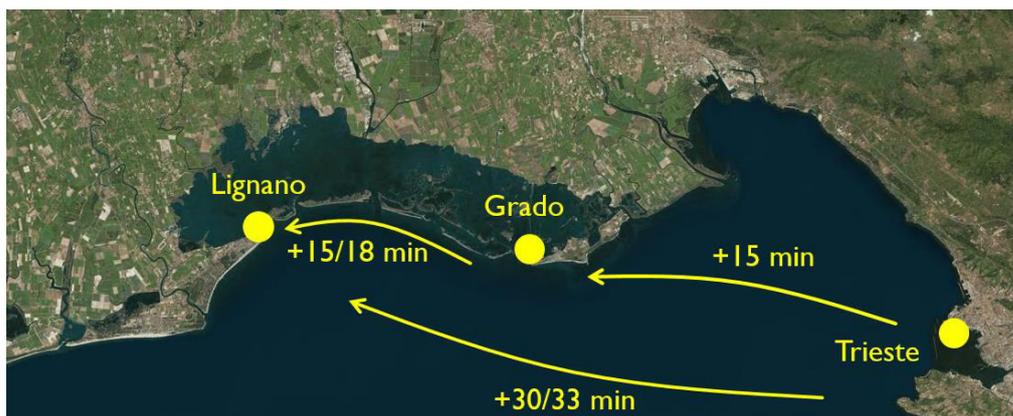
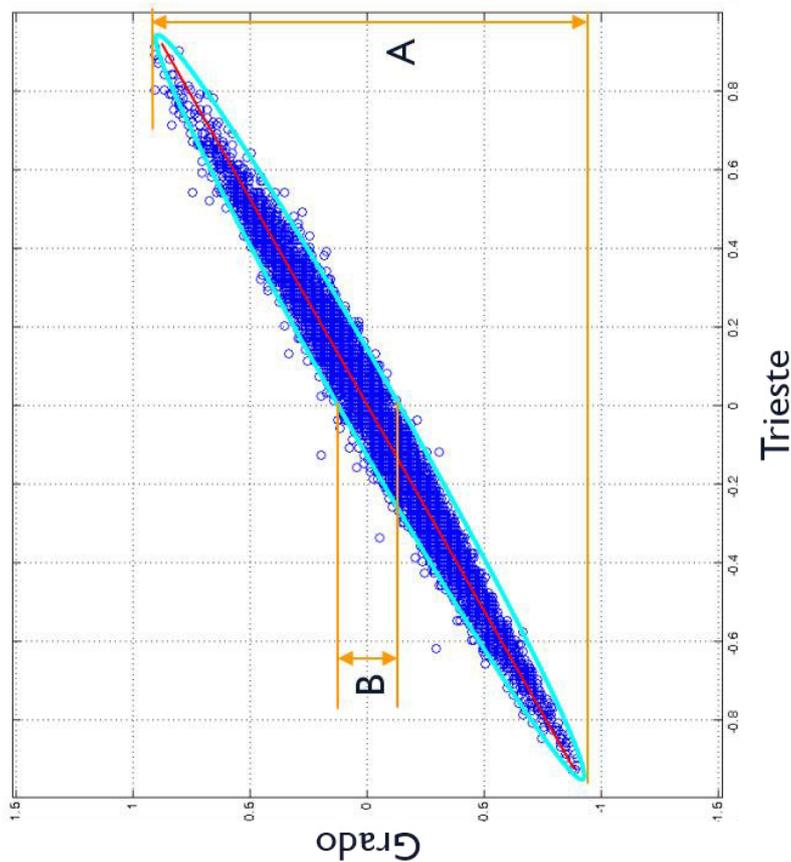
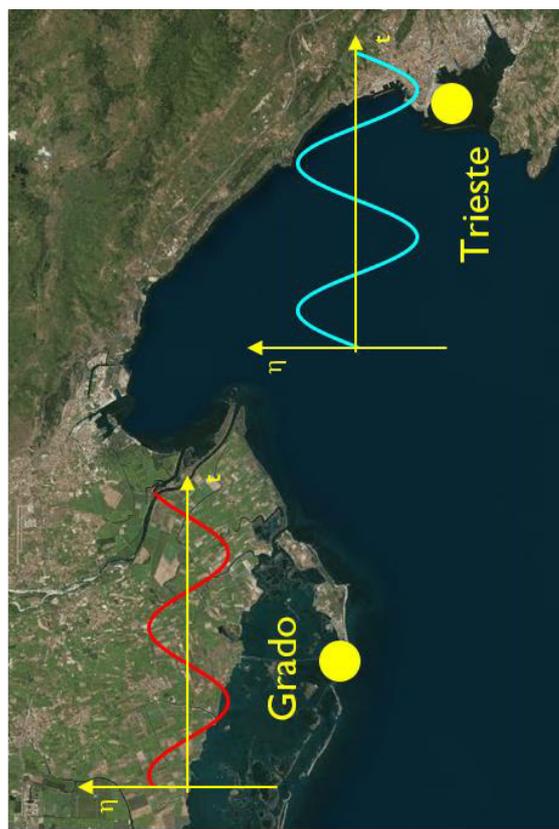
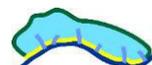


Figura 3.16. Sfasamenti calcolati/misurati tra i mareografi esterni alla laguna.

Per i mareografi esterni è stato ricavato un ritardo di fase tra Grado e Trieste di circa 15 minuti e 15÷18 minuti tra Lignano e Grado, portando complessivamente a 30÷33 min il ritardo temporale del livello registrato a Lignano rispetto a quello di Grado. Questi valori differiscono dalle indicazioni fornite dall'ISMAR secondo cui risulterebbe che l'oscillazione registrata a Grado ritarda di 25 minuti rispetto a Trieste mentre Lignano di soli 12 minuti. L'analisi è stata estesa anche ai mareografi interni di cui si riporta la sintesi in Figura 3.18.



Sfasamento di due segnali sinusoidali con diversa ampiezza

$$\varphi = \arcsin (B/A)$$

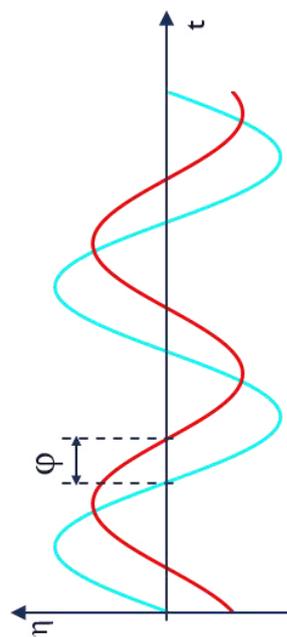


Figura 3.17. Correlazione fra i segnali dei mareografi di Grado e Trieste e procedura di calcolo dello sfasamento tra due segnali.

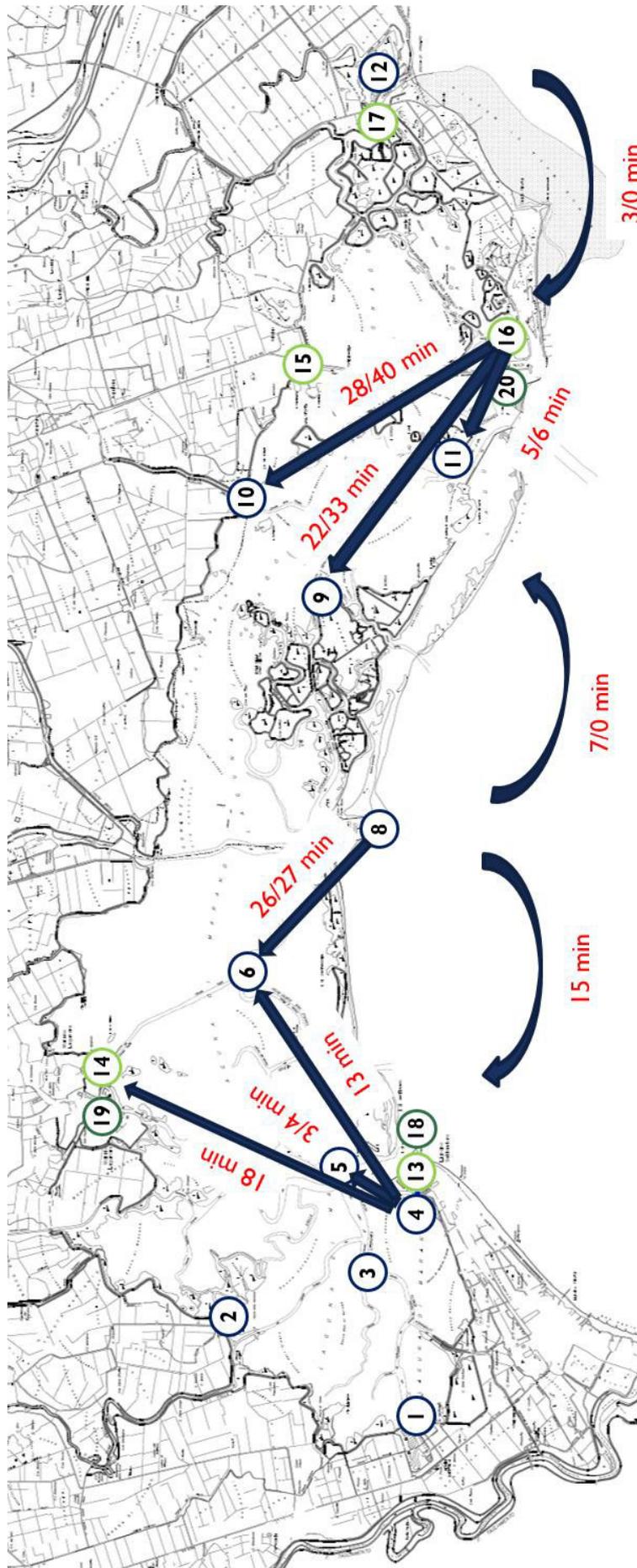
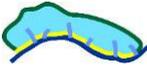
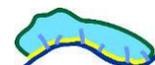


Figura 3.18. Sfasamenti calcolati/misurati tra i mareografi interni alla laguna.



### 3.2.2. Analisi dei dati anemometrici

Sono stati analizzati i dati di vento degli anemometri di Grado Meteo, Lignano Darsena e Fossalon di Grado, avendo escluso quelli di Grado Mare e Lignano per i motivi precisati nel paragrafo 3.1.2. Ad essi sono stati aggiunti i dati ricostruiti mediante modellazione numerica dall'Arpa di Palmanova.

La procedura di validazione, relativamente alle velocità registrate, si basa, come per i livelli mareografici, sul calcolo del valore medio  $\bar{v}$  e della deviazione standard  $\sigma_v$ , e sull'appartenenza della misura all'intervallo  $(\bar{v} - 3\sigma_v; \bar{v} + 3\sigma_v)$ . L'analisi, condotta sugli oltre 770000 dati, evidenzia un'ottima percentuale di presenza e di validità statistica degli stessi. Si riporta la sintesi in Tabella 3.9.

Tabella 3.9. Sintesi della validazione dei dati anemometrici reperiti in laguna.

Anemometro	Anni	Dati esistenti	% Dati esistenti	Dati validi	% Dati validi
Grado Meteo	1998-2014	349101	92.22	347898	99.66
Lignano Darsena	2000 - 2014	131030	99.65	130539	99.63
Fossalon di Grado	1995 - 2014	173812	99.14	173165	99.63
<b>Totale dati misurati</b>		<b>653943</b>	<b>95.41</b>	<b>651602</b>	<b>99.64</b>
<b>Dati ricostruiti</b>	<b>2000 - 2014</b>	<b>119224</b>	<b>90.67</b>	<b>118745</b>	<b>99.60</b>

Differentemente dai dati mareografici, l'analisi dei dati di vento non può limitarsi al calcolo di una grandezza media, come per i livelli di marea, per la sua grande variabilità sia in termini di velocità che direzione. Inoltre l'obiettivo è quello di definire delle aree omogenee cui attribuire la stessa direzione e velocità del vento nella fase di simulazione idrodinamica del moto ondoso, che si genera in laguna e interagisce con le correnti in canale.

A tal fine si è ritenuto opportuno condurre un'analisi di correlazione tra i dati registrati dagli anemometri e quelli ricostruiti mediante modello numerico, calcolandone il coefficiente di correlazione. Quanto più questo coefficiente è prossimo all'unità, migliore è la correlazione.

In Figura 3.19 si riportano, a titolo di esempio, i grafici ottenuti dalla correlazione tra i dati ricostruiti e registrati dall'anemometro di Lignano.

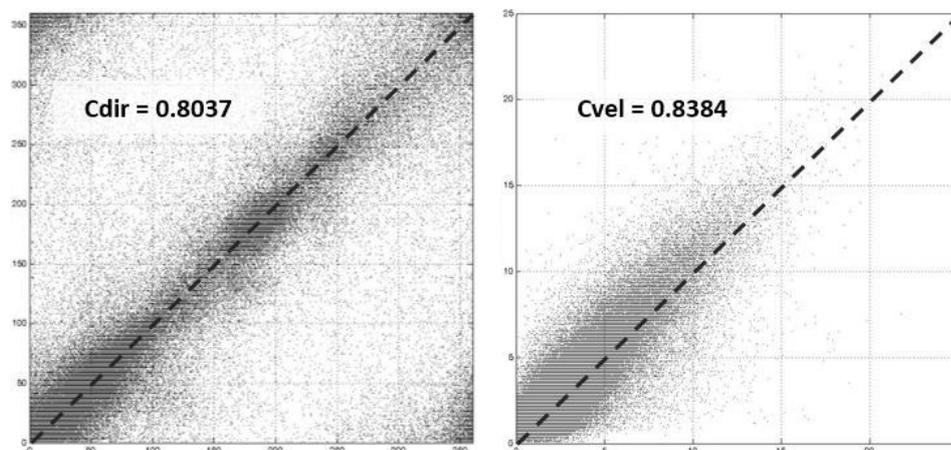
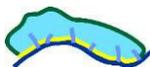


Figura 3.19. Grafici di correlazione, a sinistra per le direzioni ( $C_{dir}$ ) e a destra per le velocità ( $C_{vel}$ ), tra i dati misurati e i dati ricostruiti a Lignano.



Si osserva una buona corrispondenza tradotta dal coefficiente di correlazione superiore a 0.8 sia per le direzioni che per le velocità.

La stessa indagine è stata fatta per lo strumento di Fossalon di Grado che rivela una correlazione alta; minore, invece, è la correlazione che si riscontra sull'anemometro di Grado. In Tabella 3.10 la sintesi dei coefficienti calcolati.

Tabella 3.10. Coefficienti di correlazione tra dati misurati e dati ricostruiti con modellazione numerica.

	<b>Lignano</b>	<b>Grado</b>	<b>Fossalon</b>
n° dati	118776	97273	117772
C <sub>vel</sub>	0.8384	0.5742	0.8553
C <sub>dir</sub>	0.8037	0.6609	0.7906

Al fine di individuare delle macro-aree su cui assegnare uguale direzione e intensità di vento, sono state analizzate numerose combinazioni, correlando fra loro i dati di vento ricostruiti mediante modellazione numerica.

La configurazione che ha dato risultati soddisfacenti è quella mostrata in Figura 3.20.

L'analisi così descritta ha permesso di suddividere la laguna in due parti e di riferire la porzione occidentale a Lignano e quella orientale a Grado. Questo è ben evidenziato dai grafici riportati a titolo di esempio in Figura 3.20.

I coefficienti di correlazione indicati sono una media stimata all'interno di ciascuna parte. Sono state quindi tracciate le due macro-aree come rappresentato in Figura 3.21.

La conferma del fatto che non si potrebbe a rigore trattare la laguna dal punto di vista anemometrico come un'unica area, è ben evidenziabile nei due grafici di correlazione effettuati tra i poli di Lignano e Grado. Si osserva effettivamente come la distribuzione dei punti sia meno organizzata e più sparsa rispetto ai grafici precedenti.

Per completezza di indagine è stata condotta un'analisi di correlazione anche tra i dati misurati e ricostruiti mediante modellazione numerica, nell'area esterna alla laguna di Marano e Grado, con riferimento alle stazioni di Figura 3.6.

La correlazione, al di fuori del territorio regionale, globalmente, si rivela molto scarsa.

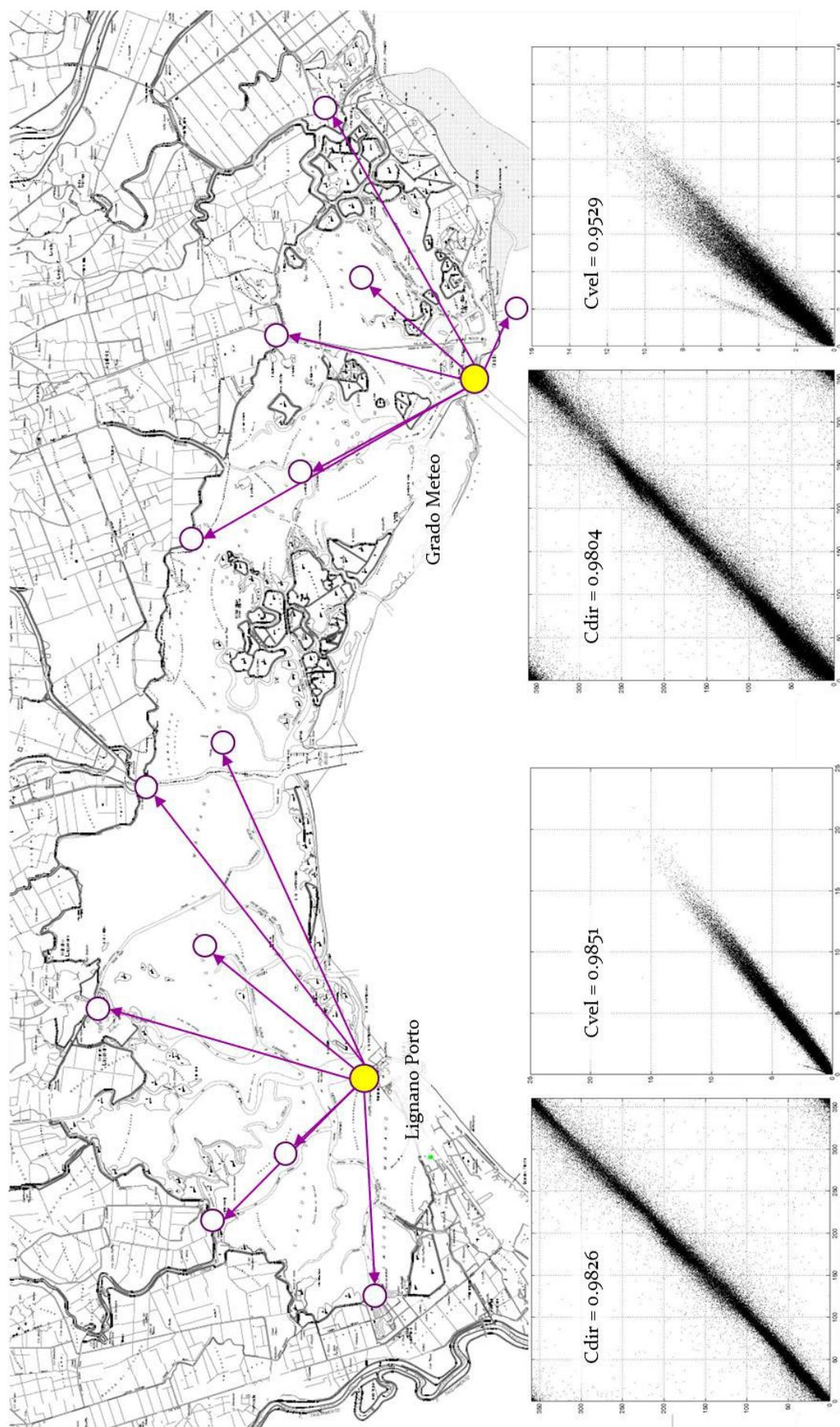
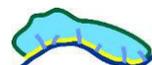


Figura 3.20. Analisi di correlazione tra i dati di vento ricostruiti mediante modellazione numerica.

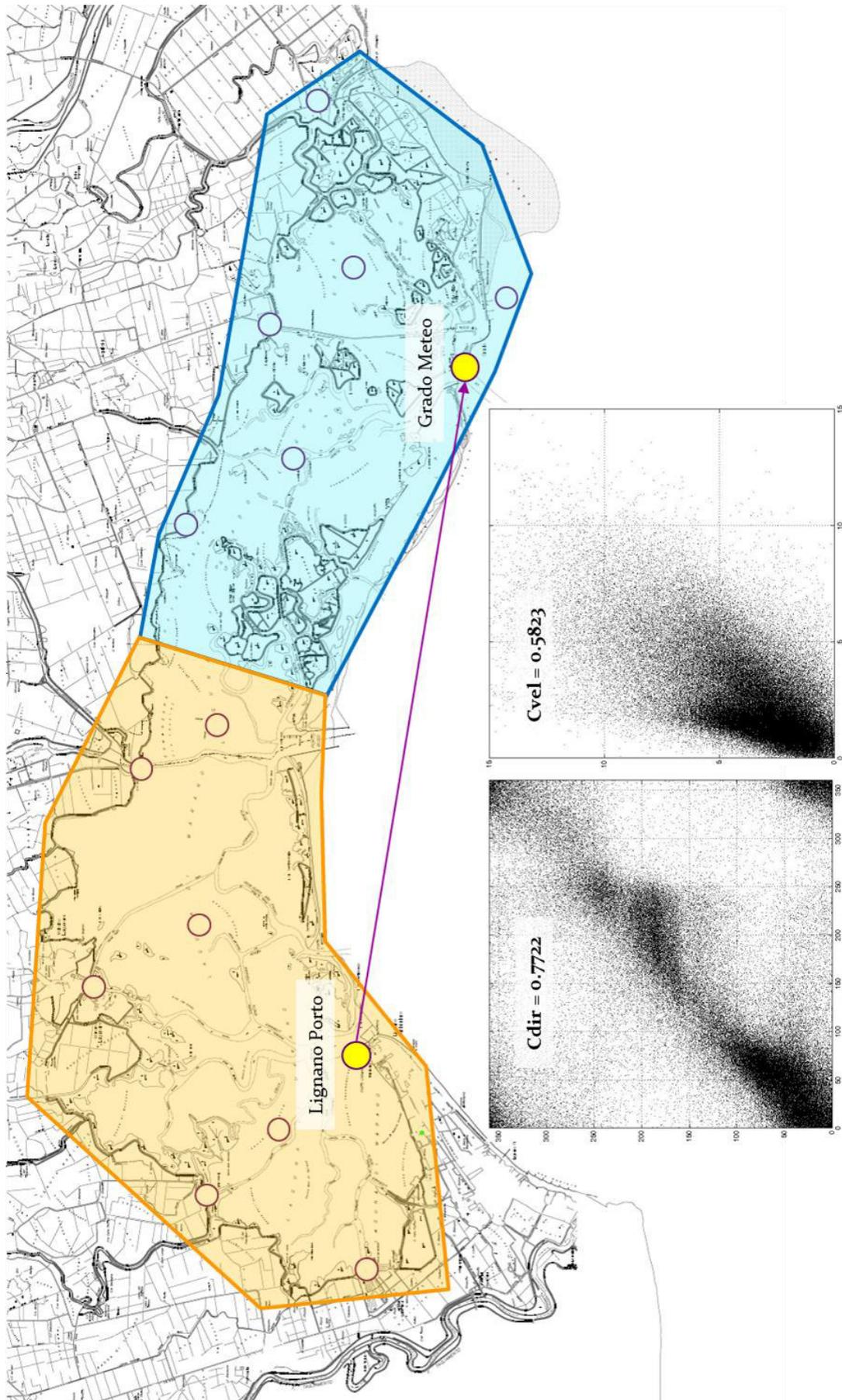
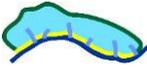
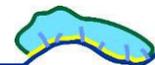


Figura 3.21. Identificazione delle macroreefe su cui assegnare dati di vento omogenei e analisi di correlazione fra i poli di Lignano e Grado.



### 3.3. Descrizione dei modelli numerici

Prima di procedere con la descrizione del modello idrodinamico delle correnti e del moto ondoso della laguna di Marano e Grado, si ritiene opportuno descrivere sinteticamente le caratteristiche dei modelli matematici e numerici che sono stati adottati per le simulazioni.

Nello specifico si tratta di tre modelli:

- modello idrodinamico *dam\_hyd*, implementato dal gruppo di ricerca di Idraulica dell'Università di Udine, per la simulazione del campo di moto indotto all'interno della laguna dalle oscillazioni di marea;
- modello morfodinamico *dam\_sed*, implementato dal gruppo di ricerca di Idraulica dell'Università di Udine, per la simulazione del trasporto solido e dell'evoluzione morfologica della laguna;
- modello spettrale SWAN, *open source* della *Delft University of Technology*, per la generazione del moto ondoso indotto dal vento e sua successiva propagazione all'interno della laguna;
- modello accoppiato *dam\_swan*, implementato dal gruppo di ricerca di Idraulica dell'Università di Udine, per la simulazione della complessa interazione fra moto ondoso e correnti di marea, responsabile dell'evoluzione morfologica della laguna.

#### 3.3.1. Descrizione del modello idrodinamico

Il modello numerico, utilizzato per le simulazioni, è un codice di calcolo bidimensionale (2DH) messo a punto, a partire dai primi anni 2000, dal gruppo di ricerca di Idraulica dell'Università degli Studi di Udine, coordinato dal prof. Petti.

Nel tempo, il codice è stato verificato, migliorato ed applicato a diversi casi di studio riguardanti il moto di correnti idrauliche a superficie libera, come per esempio:

- dinamica delle colate detritiche;
- dinamica delle valanghe;
- propagazione 2D delle onde di piena, tracimazioni arginali e conseguenti dinamiche di propagazione su aree esterne (incluse quelle urbane);
- dinamica di propagazione dei flussi d'acqua conseguenti a fenomeni di crollo diga;
- campo idrodinamico, trasporto di inquinanti e trasporto solido in aree lagunari;
- dinamica del moto ondoso in prossimità delle coste ed in presenza di strutture;

Un sicuro vantaggio, legato allo sviluppo in proprio del modello, è stato quello di un aggiornamento in tempo reale con le ultime novità scientifiche, sia concettuali che tecniche. Inoltre, mantenendo la stessa struttura di base, è stato possibile estendere la modellazione a campi diversi, come menzionato in precedenza.

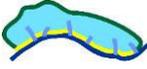
Il modello idrodinamico utilizzato nel presente studio, denominato *dam\_hyd*, nelle sue linee essenziali integra numericamente le equazioni bidimensionali 2DH di De Saint Venant basate su due principi fondamentali della meccanica dei fluidi:

1. il principio di conservazione della massa;
2. il principio di conservazione della quantità di moto.

In termini analitici, la forma conservativa di tali principi si può esprimere come:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial (\mathbf{F}_c + \mathbf{F}_v)}{\partial x} + \frac{\partial (\mathbf{G}_c + \mathbf{G}_v)}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (3.4)$$

dove  $\mathbf{U} = \mathbf{U}(x, y, t)$  è il vettore delle variabili indipendenti,  $\mathbf{F}_c = \mathbf{F}_c(x, y, t)$  e  $\mathbf{G}_c = \mathbf{G}_c(x, y, t)$  vettori



dei flussi convettivi, dati rispettivamente da:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ Uh \\ Vh \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_c(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} Uh \\ U^2h + gh^2/2 \\ UVh \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_c(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} Vh \\ UVh \\ V^2h + gh^2/2 \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

$\mathbf{F}_v = \mathbf{F}_v(x, y, t)$  e  $\mathbf{G}_v = \mathbf{G}_v(x, y, t)$  vettori dei flussi viscosi:

$$\mathbf{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -2\nu_t h \frac{\partial U}{\partial x} \\ -\nu_t h \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -\nu_t h \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \\ -2\nu_t h \frac{\partial V}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

e infine  $\mathbf{S} = \mathbf{S}(x, y, t)$  il termine sorgente:

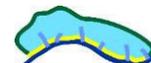
$$\mathbf{S}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial z_f}{\partial x} - \frac{\tau_{mx}}{\rho} + \rho_a C_d \sqrt{U_w^2 + V_w^2} \frac{U_w}{\rho} + fVh + \frac{F_x}{\rho} \\ -gh \frac{\partial z_f}{\partial y} - \frac{\tau_{my}}{\rho} + \rho_a C_d \sqrt{U_w^2 + V_w^2} \frac{V_w}{\rho} - fUh + \frac{F_y}{\rho} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

In componenti scalari,  $U$  e  $V$  rappresentano le velocità mediate lungo la verticale, rispettivamente nelle direzioni  $x$  ed  $y$ ,  $h$  il tirante,  $g$  l'accelerazione di gravità,  $\nu_t$  la viscosità cinematica turbolenta,  $z_f$  la quota del fondo,  $n$  il coefficiente di resistenza di Manning,  $F_x$  e  $F_y$  le forzanti in direzione  $x$  ed  $y$ , dovute alla presenza del *radiation stress* indotto dal moto ondoso,  $\rho$  e  $\rho_a$  la densità dell'acqua aria,  $C_d$  il coefficiente di drag,  $U_w$  e  $V_w$  le velocità del vento in direzione  $x$  e  $y$ , generalmente prese ad un'altezza pari a 10 m sulla superficie libera e  $f$  il parametro di Coriolis, dipendente dalla velocità di rotazione del geoide e dalla latitudine.

Le tensioni tangenziali medie al fondo sono date dalla sovrapposizione delle tensioni della sola corrente  $\tau_c$  e da quelle del moto ondoso  $\tau_w$ , combinate secondo la teoria di Soulsby (1995):

$$\tau_m = \tau_c \left[ 1 + 1.2 \left( \frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (3.8)$$

Per la presente applicazione le tensioni di corrente e moto ondoso sono state ricavate come:



$$\begin{cases} \tau_c = -\rho g n^2 (U^2 + V^2) / h^{1/3} \\ \tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_{1m}^2 \end{cases} \quad (3.9)$$

dove  $n$  è il coefficiente di resistenza di Manning,  $f_w$  la *friction factor* e  $U_{1m}$  la velocità orbitale al fondo.

L'equazione (3.4) risulta sia matematicamente che fisicamente conservativa; quest'ultima proprietà consente di cogliere correttamente i passaggi di corrente ipercritica-subcritica, come per esempio la formazione di risalti idraulici mobili o stazionari.

Nel modello *dam\_hyd* le equazioni (3.4) sono integrate numericamente con il metodo dei volumi finiti (FVM). Questo metodo, allo stato attuale delle conoscenze, risulta uno strumento molto valido che, attraverso una formulazione integrale delle leggi di conservazione, consente di ottenere in maniera naturale schemi conservativi e di tipo "shock-capturing", in grado cioè di cogliere al meglio discontinuità: un esempio riguarda la propagazione di un fronte d'acqua su terreno asciutto, fenomeno che puntualmente si manifesta in laguna ad ogni ciclo di marea, con la sommersione ed emersione delle barene.

Il metodo FVM, sebbene sviluppato come una formulazione particolare del metodo alle Differenze Finite (FDM), diversamente da quest'ultimo, integra le equazioni in acque basse, termine con il quale spesso ci si riferisce alle equazioni (3.4), su volumi finiti anziché infinitesimi.

In breve, il metodo dei volumi finiti consiste nella discretizzazione del dominio d'integrazione in celle (volumi di controllo), nel presente lavoro di tipo quadrangolare irregolare e nell'applicazione dei principi (3.4) ad ogni singola cella *i-esima* (Figura 3.22).

Integrando l'equazione (3.4) sul generico volume di controllo  $\Omega_i$  (Figura 3.23) si ottiene:

$$\frac{d\bar{\mathbf{U}}}{dt} = -\frac{1}{\Omega_i} \oint_{\partial\Omega_i} \mathbf{H} \cdot \mathbf{n} dl - \bar{\mathbf{S}} \quad (3.10)$$

dove:

$$\bar{\mathbf{U}}(t) = \frac{1}{\Omega_i} \int_{\Omega_i} \mathbf{U}(x, y, t) d\Omega_i, \quad \bar{\mathbf{S}}(t) = \frac{1}{\Omega_i} \int_{\Omega_i} \mathbf{S}(x, y, t) d\Omega_i \quad (3.11)$$

$\mathbf{H} = [\mathbf{F}_c(\mathbf{U}) + \mathbf{F}_v(\mathbf{U}) \mathbf{G}_c(\mathbf{U}) + \mathbf{G}_v(\mathbf{U})]$  è un tensore costruito con i vettori dei flussi lungo x-y ed  $\mathbf{n}$  il versore ortogonale all'elemento infinitesimo di contorno  $dl$  del volume  $\Omega_i$ .

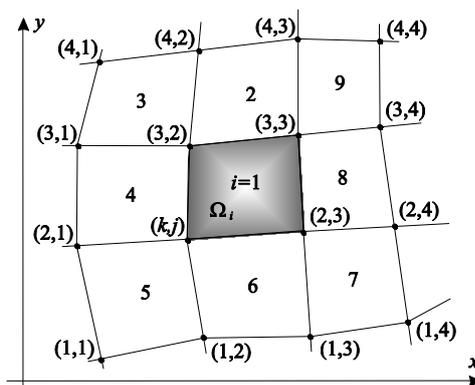


Figura 3.22. Suddivisione in celle, intese come volumi di controllo, del dominio di calcolo.

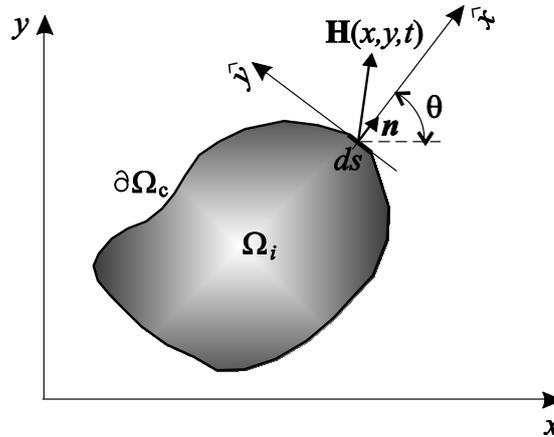
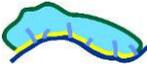


Figura 3.23. Generico volume di controllo.

Nei limiti di un'accuratezza del secondo ordine, la soluzione numerica dell'equazione (3.10) equivale a quella dei sistemi:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\mathbf{U}}}{dt} = \mathbf{L}(\mathbf{U}) \\ \bar{\mathbf{U}}(t) = \bar{\mathbf{U}}^n \end{cases} \Rightarrow \bar{\mathbf{U}}^{adv} \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\mathbf{U}}}{dt} = \bar{\mathbf{S}} \\ \bar{\mathbf{U}}(t) = \bar{\mathbf{U}}^{adv} \end{cases} \Rightarrow \bar{\mathbf{U}}^{n+1} = \bar{\mathbf{U}}(t + \Delta t). \quad (3.13)$$

dove  $\mathbf{L}(\mathbf{U})$  è un operatore definito come:

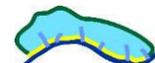
$$\mathbf{L}(\mathbf{U}) = -\frac{1}{\Omega_i} \oint_{\partial\Omega_i} \mathbf{H} \cdot \mathbf{n} dl. \quad (3.14)$$

La soluzione ottenuta passando attraverso la "scomposizione" (3.12) e (3.13) prende il nome di metodo "Strang-splitting".

Il sistema (3.13) può essere integrato in maniera relativamente semplice con i metodi tradizionali delle differenze finite. Per il sistema (3.12), di tipo iperbolico puro, si può utilizzare una tecnica *up-wind* riscrivendo l'operatore  $\mathbf{L}(\mathbf{U})$  nella forma discreta:

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{L}(\mathbf{U}_i) = -\frac{1}{\Omega_i} \oint_{\partial\Omega_i} \mathbf{H} \cdot \mathbf{n} dl = -\frac{1}{\Omega_i} \left( \sum_{k=1}^4 \mathbf{T}_{ik}^{-1} \mathbf{F}_{ik} \Delta l_{ik} \right) \quad (3.15)$$

dove  $\mathbf{F}_{ik}$  è dato dalla somma del flusso convettivo e turbolento nella direzione  $\mathbf{n}_{ik}$  che attraversa il generico lato  $k$ -esimo di contorno del volume di controllo  $\Omega_i$  e  $\mathbf{T}_{ik}^{-1}$  è la matrice di rotazione inversa:



$$\mathbf{T}_{ik}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & n_x & -n_y \\ 0 & n_y & n_x \end{bmatrix}_{ik} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}_{ik} \quad (3.16)$$

essendo  $\theta$  l'inclinazione del versore  $\mathbf{n}_{ik}$  rispetto all'asse  $x$  (Figure 3.23 e 3.24).

Tramite l'equazione (3.12) e relativa discretizzazione (3.15), il problema rappresentato dall'equazione (3.4) viene ricondotto al calcolo delle quantità  $\mathbf{F}_{cik}$  e  $\mathbf{F}_{vik}$  (vettori dei flussi intercella convettivi e turbolenti nella direzione  $\mathbf{n}_{ik}$ ).

In questa fase i flussi intercella di natura turbolenta vengono stimati con una tecnica alle differenze finite, mentre la viscosità cinematica turbolenta viene assunta costante sulla cella e valutata con un approccio alla Smagorinsky (Smagorinsky, 1963).

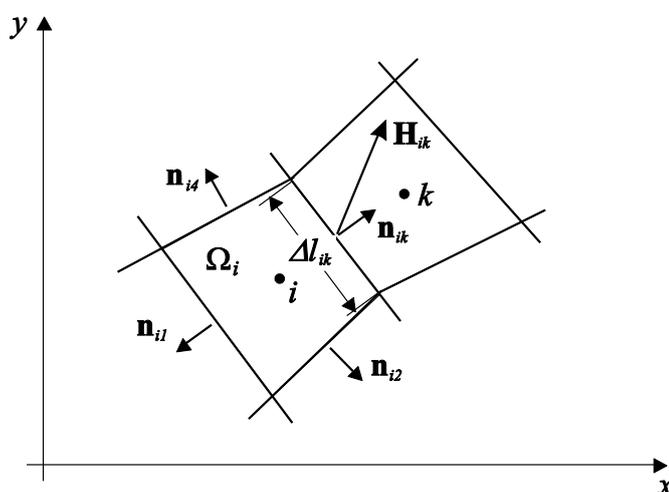
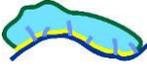


Figura 3.24. Schema di applicazione del metodo FVM.

Il metodo utilizzato per stimare il flusso convettivo  $\mathbf{F}_{cik}$ , che prende il nome di solutore, costituisce il nucleo delle tecniche ai volumi finiti. Tale stima può essere fatta sia utilizzando il solutore esatto di *Riemann* che solutori approssimati.

Da un punto di vista puramente numerico i risultati che si ottengono con il solutore esatto non differiscono in maniera apprezzabile da quelli che si conseguono con i solutori approssimati. Per questo motivo nel presente modello è stato utilizzato un solutore approssimato denominato HLLC (*Harten - Lax - van Leer - contact*), computazionalmente molto efficiente ed accurato purché applicato a problemi idrodinamici puri (Toro, 2001). Al solutore HLLC è stata accoppiata una ricostruzione idrostatica delle variabili, che assicura il rispetto della *C-property* anche in situazioni di asciutto - bagnato (Audusse et al., 2004, Liang and Marche, 2009), condizione di estrema importanza nello studio di un sistema lagunare, dove le aree barenicole sono soggette a continui cicli di emersione - sommersione.

Il solutore HLLC, che sfrutta il carattere iperbolico dell'equazione (3.4), ottiene la stima dei flussi intercella risolvendo in maniera approssimata un problema di *Riemann* locale. In particolare, operando nel piano delle caratteristiche ed in una logica *up-wind*, consente di arrivare alla stima di  $\mathbf{F}_{ik}$  mediante l'espressione approssimata:



$$\mathbf{F}_{cik} = \begin{cases} \mathbf{F}(\mathbf{U}_i) & \text{se } 0 \leq S_i \\ \mathbf{F}(\mathbf{U}_i) + S_i (\mathbf{U}_i^{hllc} - \mathbf{U}_i) & \text{se } S_i \leq 0 \leq \tilde{S} \\ \mathbf{F}(\mathbf{U}_k) + S_k (\mathbf{U}_k^{hllc} - \mathbf{U}_k) & \text{se } \tilde{S} \leq 0 \leq S_k \\ \mathbf{F}(\mathbf{U}_k) & \text{se } 0 \geq S_k \end{cases}, \quad (3.17)$$

con

$$\mathbf{U}_i^{hllc} = h_i \frac{S_i - U_i}{S_i - \tilde{S}} \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{S} \\ V_i \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{U}_k^{hllc} = h_k \frac{S_k - U_k}{S_k - \tilde{S}} \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{S} \\ V_k \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

dove i pedici  $i$  e  $k$  hanno il significato di stato nella cella di calcolo  $i$  e nella cella adiacente  $k$  a cavallo del lato  $\Delta l_{ik}$  (Figura 3.24); in particolare  $U_k$  ed  $U_i$  sono le velocità medie del flusso in direzione  $\mathbf{n}_{ik}$ , mentre le grandezze  $V_k$  ed  $V_i$  sono le velocità medie del flusso in direzione ortogonale a  $\mathbf{n}_{ik}$ . Per il calcolo delle quantità  $S_i$ ,  $S_k$  e  $\tilde{S}$  si rimanda a Toro (2001).

L'applicazione dei metodi qui descritti richiede l'attribuzione del valore assunto dalla variabile di stato  $\bar{U}$  in un punto interno della cella chiamato "centro cella". Nel presente modello come centro cella è stato scelto il baricentro del volume  $\Omega_i$ .

Trattandosi di uno schema di tipo esplicito, deve essere rispettata la condizione di *Courant–Friedrichs–Lévy*:

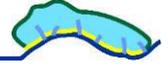
$$CFL = \frac{\Delta t}{\Delta l_{\min}} S_{\max} < 1 \quad (3.19)$$

necessaria per la stabilità dello schema di integrazione. Nella (3.19),  $S_{\max}$  è la massima velocità di propagazione delle perturbazioni infinitesime presente nel dominio di integrazione e  $\Delta l_{\min}$  la dimensione minima tra tutte le celle che concorrono a coprire il dominio;  $\Delta t$  è il massimo incremento temporale compatibile con la condizione (3.19). Per tutte le simulazioni fatte in questo lavoro è stato assunto un valore costante di  $CFL$  pari a 0.8, di conseguenza l'intervallo discreto d'integrazione risulta:

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta l_{\min}}{S_{\max}} = 0.8 \frac{\Delta l_{\min}}{S_{\max}}, \quad (3.20)$$

variabile in funzione di  $S_{\max}$ .

Maggiori dettagli sul modello possono trovarsi nei riferimenti bibliografici riportati al termine della presente relazione.



### 3.3.2. Descrizione del modello morfodinamico

Il modello morfodinamico *dam\_sed* si basa sul modello idrodinamico *dam\_hyd* a cui è stato aggiunto un modulo per lo studio del trasporto solido e dell'evoluzione morfologica del fondo.

Il materiale solido può essere trasportato da una corrente essenzialmente in due modi: in sospensione, per quanto riguarda i sedimenti più fini e al fondo, relativamente alla frazione più grossolana.

Con un approccio ben noto in letteratura, il trasporto solido al fondo ed in sospensione vengono trattati separatamente, adottando per il primo un criterio di equilibrio, in cui la portata solida corrisponde alla capacità di trasporto e per il secondo un metodo di non-equilibrio, studiando la distribuzione e propagazione dei sedimenti all'interno della corrente.

Fra le diverse formule di natura teorico-sperimentale per la valutazione della portata solida al fondo, in questa sede si è adottata la formula di van Rijn (1993):

$$q_b = 0.25\alpha d_{50} \left( \frac{\tau'_m}{\rho} \right)^{0.5} D_*^{-0.3} \left( \frac{\tau'_m - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}} \right)^{1.5}, \quad (3.21)$$

dove  $\alpha$  è un coefficiente che dipende dall'altezza d'onda e dal tirante,  $d_{50}$  è il diametro mediano dei sedimenti,  $\tau'_m$  è la tensione media al fondo relativa al grano, calcolata secondo la teoria di Soulsby (1995),  $D_*$  la variabile adimensionale nota come diametro del grano e  $\tau_{b,cr}$  è la tensione critica relativa al trasporto solido al fondo, calcolata secondo Soulsby (1997) e corretta per tener conto della pendenza del fondo.

Per il trasporto in sospensione invece l'approccio di non-equilibrio prevede lo studio della concentrazione dei sedimenti in sospensione.

Nell'ambito delle scelte attuate per la modellazione idrodinamica, anche lo studio della distribuzione dei sedimenti in sospensione viene effettuato con grandezze mediate sulla verticale e l'andamento della concentrazione media dei sedimenti sulla verticale  $C$ . L'applicazione del principio di conservazione della massa di sedimenti sospesi, permette di pervenire all'equazione avvevivo – diffusiva:

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial UCh}{\partial x} + \frac{\partial VCh}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t h \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t h \frac{\partial C}{\partial y} \right) = E - D, \quad (3.22)$$

dove, nel termine sorgente a secondo membro,  $E$  rappresenta il tasso di erosione e  $D$  quello di deposizione.

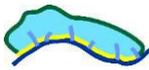
L'ambiente lagunare è caratterizzato dalla coesistenza di materiale sabbioso e coesivo: il primo localizzato soprattutto in prossimità delle bocche lagunari e all'interno dei canali principali, il secondo diffuso nelle piane di marea e nei canali più interni; si è tenuto conto di questa differenziazione tra materiale solido di tipo granulare o coesivo, studiando separatamente la distribuzione delle due frazioni e risolvendo quindi due equazioni avvevivo – diffusive indipendenti per i sedimenti granulari e per quelli coesivi.

Questa distinzione è necessaria poiché, se per i materiali granulari il comportamento delle particelle è governato principalmente dal peso proprio del sedimento, nel caso di materiale fine non si può prescindere dalle forze coesive che si sviluppano tra i grani.

I due approcci si distinguono nella valutazione del termine sorgente  $E - D$ , che nel caso di sedimento granulare vale:

$$E - D = w_s (c_a - c_0), \quad (3.23)$$

dove  $w_s$  è la velocità di caduta dei sedimenti valutata secondo Soulsby (1997),  $c_a$  e  $c_0$  sono



rispettivamente la concentrazione dei sedimenti in condizioni di equilibrio e quella invece effettivamente calcolata entrambe valutate alla stessa quota di riferimento,  $c_a$  è quantificata con un metodo proposto da van Rijn (1993), mentre  $c_0$  è calcolata a partire dal valore mediato  $C$ , assumendo il profilo di concentrazione sulla verticale proposto da Soulsby (1997).

Per la frazione coesiva, invece, il tasso di erosione  $E$  e quello di sedimentazione  $D$ , vengono calcolati separatamente.

In particolare  $E$  si basa sulla trattazione di Patherniades (1965), in cui la tensione critica di erosione viene assegnata in base al grado di consolidazione del fondo.

Il tasso di deposizione  $D$ , invece, viene calcolato seguendo l'approccio di Krone del 1962, assumendo la velocità di caduta proposta da Whitehouse et al. (2000).

Sia nel caso di materiale granulare che coesivo, l'equazione avveffivo-diffusiva viene risolta numericamente mediante la tecnica dei volumi finiti, in stretta analogia a quanto condotto nel modulo idrodinamico.

Il modello matematico è completato dai due bilanci di materiale solido granulare e di materiale solido coesivo applicati ad uno stesso volume di controllo al fondo, al fine di determinare la variazione nel tempo della quota del fondo di materiale granulare e coesivo per effetto di depositi ed erosioni conseguenti al trasporto solido:

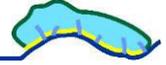
$$\left( \frac{\partial z_f}{\partial t} \right)_{gran} = - \frac{1}{1 - n_{por}} (\nabla \cdot \mathbf{q}_b + E - D), \quad (3.24)$$

$$\left( \frac{\partial z_f}{\partial t} \right)_{coes} = -(E - D), \quad (3.25)$$

dove  $n_{por}$  è la porosità del sedimento.

La variazione complessiva della quota del fondo sarà infine data dalla somma algebrica del contributo granulare e di quello coesivo.

Al fine di rappresentare l'evoluzione morfologica su una durata di tempo diversa e più ampia rispetto a quella dei fenomeni idrodinamici, si può ricorrere ad un fattore di scala, detto anche fattore geomorfologico.



### 3.3.3. Descrizione del modello spettrale

SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) è un modello spettrale alle differenze finite sviluppato dalla *Delft University of Technology* a partire dalla fine degli anni '90 (Booij et al., 1999).

Come tutti i modelli denominati di “terza generazione”, SWAN risolve l'equazione completa di bilancio della *wave action*

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N}{\partial y} + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (3.26)$$

essendo  $N$  la *wave action*, definita dal rapporto  $S/\sigma$ , con  $S$  densità spettrale di energia e  $\sigma$  pulsazione relativa;  $\theta$  è la direzione;  $(c_{g,x}, c_{g,y}, c_{\sigma}, c_{\theta}) = \left( \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{d\sigma}{dt}, \frac{d\theta}{dt} \right)$  le componenti di velocità di propagazione dell'energia nello spazio cartesiano  $(x, y)$  e in quello spettrale  $(\sigma, \theta)$ ;  $S_{tot}$  il termine sorgente comprensivo di tutti i contributi di energia legati alla generazione da vento, alle dissipazioni per frangimento in acque profonde e basse, all'attrito al fondo e soprattutto ai trasferimenti di energia dovuti alle interazioni non lineari fra componenti d'onda a diversa frequenza.

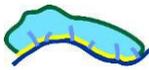
L'equazione di bilancio della *wave action* (3.26) viene discretizzata nel tempo con lo schema di Eulero implicito al prim'ordine.

Se da una parte questo permette di prescindere dal rispetto della condizione di stabilità di *Courant-Friedrichs-Lévy* (3.19), come accade per i metodi espliciti, dall'altra lascia libertà sulla scelta del *time step* di integrazione; da quest'ultimo tuttavia dipendono sia l'accuratezza della soluzione che il tempo computazionale di calcolo, che può risultare vincolante nel caso in cui si voglia simulare eventi di una certa durata e su domini particolarmente estesi.

Essendo la densità spettrale di energia definita sia nello spazio geografico  $(x, y)$  che nel dominio spettrale  $(\sigma, \theta)$ , è richiesta la discretizzazione di entrambi.

Per il piano  $(x, y)$  si possono adottare sia *mesh* regolari che non strutturate ad elementi triangolari. Queste ultime presentano il vantaggio di essere più flessibili e facilmente raffittite nelle parti del dominio che necessitano di una rappresentazione più dettagliata, connessa ad esempio alle variazioni del fondo. Lo spazio spettrale richiede invece una discretizzazione strutturata con settori angolari  $\Delta\theta$  costanti e distribuzione logaritmica delle frequenze tale che risulti costante la risoluzione  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ .

Per maggiori dettagli sullo schema numerico adottato in SWAN si rimanda al relativo manuale tecnico scientifico (SWAN Team, 2013).



### 3.3.4. Descrizione del modello accoppiato idrodinamico/morfodinamico - spettrale

Per simulare la complessa interazione idrodinamica tra una corrente di tipo fluviale e il moto ondoso generato dal vento, è necessario utilizzare un modello che sappia cogliere entrambi i fenomeni ed interpretarne l'influenza reciproca.

Nello specifico i due campi di moto interagiscono attraverso tre grandezze fondamentali:

- la *wave action*, che sintetizza il contenuto energetico del moto ondoso;
- le forzanti idrodinamiche legate al *radiation stress*, ossia l'eccesso di spinta associato al moto ondoso;
- le tensioni al fondo di cui risente la corrente e che risultano incrementate per la presenza del moto ondoso oscillante.

Il codice numerico *dam\_swan*, sviluppato dal gruppo di ricerca di Idraulica dell'Università di Udine, gestisce l'accoppiamento tra il modello spettrale SWAN e il modello idrodinamico *dam\_hyd* o il modello morfodinamico *dam\_sed*, descritti precedentemente.

I due moduli interagiscono a intervalli discreti di tempo  $\Delta t_{int}$ : essi vengono mandati in esecuzione separatamente e in successione, in maniera tale da aggiornare progressivamente i parametri di moto ondoso, le forzanti da *radiation stress*, le tensioni al fondo e il campo di corrente.

Nel dettaglio, per ciascun *run*, il modello spettrale fornisce in *output* le grandezze richieste dal modello idro/morfodinamico, ossia: le forzanti da *radiation stress* ( $F_x, F_y$ ) e le caratteristiche del moto ondoso (velocità orbitale  $u_{bot}$ , periodo  $T_{bot}$ , altezza d'onda significativa  $H_s$  e direzione di provenienza del moto ondoso  $\theta$ ).

Alcune di queste grandezze sono necessarie solamente al modello morfodinamico ( $H_s$  e  $\theta$ ), mentre velocità orbitale e periodo sono indispensabili anche al modello idrodinamico, perché da queste dipende l'escursione massima  $a_{1m}$ :

$$a_{1m} = \frac{u_{bot} T_{bot}}{2\pi} \quad (3.27)$$

essendo

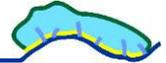
$$\begin{cases} u_{bot} = \sqrt{2} u_{rms,bot} \\ u_{rms,bot} = \sqrt{\iint \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kh)} S(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \end{cases} \quad (3.28)$$

e

$$a_{1m} = \sqrt{2 \iint \frac{1}{\sinh^2(kh)} S(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \quad (3.29)$$

dove  $h$  è il tirante e  $k$  il numero d'onda;  $a_{1m}$  è richiesta per il calcolo della tensione  $\tau_w$  prodotta dal moto ondoso che a sua volta è necessaria per il calcolo della tensione tangenziale media al fondo secondo l'approccio di Soulsby riportato nell'equazione (3.8).

Le variabili ( $F_x, F_y$ ),  $u_{bot}$  e  $T_{bot}$  vengono quindi passate in *input* al modello idrodinamico, responsabile del calcolo del tirante  $h$  e delle velocità della corrente nelle due direzioni principali ( $U, V$ ).



Nel caso di applicazione del modello morfodinamico, ai dati elencati, si aggiungeranno dunque  $H_s$  e  $\theta$  e il modello, oltre ad  $h$ ,  $U$  e  $V$ , fornirà anche la nuova quota del fondo  $z_f$ .

I valori idrodinamici aggiornati (con l'aggiunta eventuale della nuova quota del fondo) vengono infine passati in *input* al modello spettrale per il successivo *time step* di integrazione.

Ciascun modulo lavora separatamente sulla propria griglia computazionale, distinta sia per dimensione che per struttura, legata alle differenti tecniche numeriche implementate.

SWAN, come visto, prevede sia *mesh* regolari che non strutturate e deve coprire un'area in genere più estesa del dominio idrodinamico, discretizzato invece sempre con elementi quadrangolari.

È necessario, a questo riguardo, gestire il passaggio dei dati in *output* forniti da ciascun modulo avente le proprie convenzioni di scrittura e griglia di competenza e tradurli in *input* compatibili con l'altro modello e relativa *mesh* di calcolo.

Per facilitare queste operazioni di trasferimento e riscrittura dei dati, il codice sviluppato si appoggia ad una griglia cartesiana di scambio o *frame* su cui gli stessi vengono interpolati.

Questo comporta che, ad ogni *run*, il modello accoppiato gestisca due passaggi:

- l'interpolazione sui nodi del modello idrodinamico, delle variabili che SWAN salva in *output* sui nodi del grigliato regolare (*frame*);
- l'interpolazione, sui nodi del *frame*, delle variabili salvate in *output* dal modello idrodinamico nei centri cella della *mesh*.

L'intero processo viene gestito da un *main program* di interfaccia, come descritto negli schemi di Figura 3.25 e 3.26.

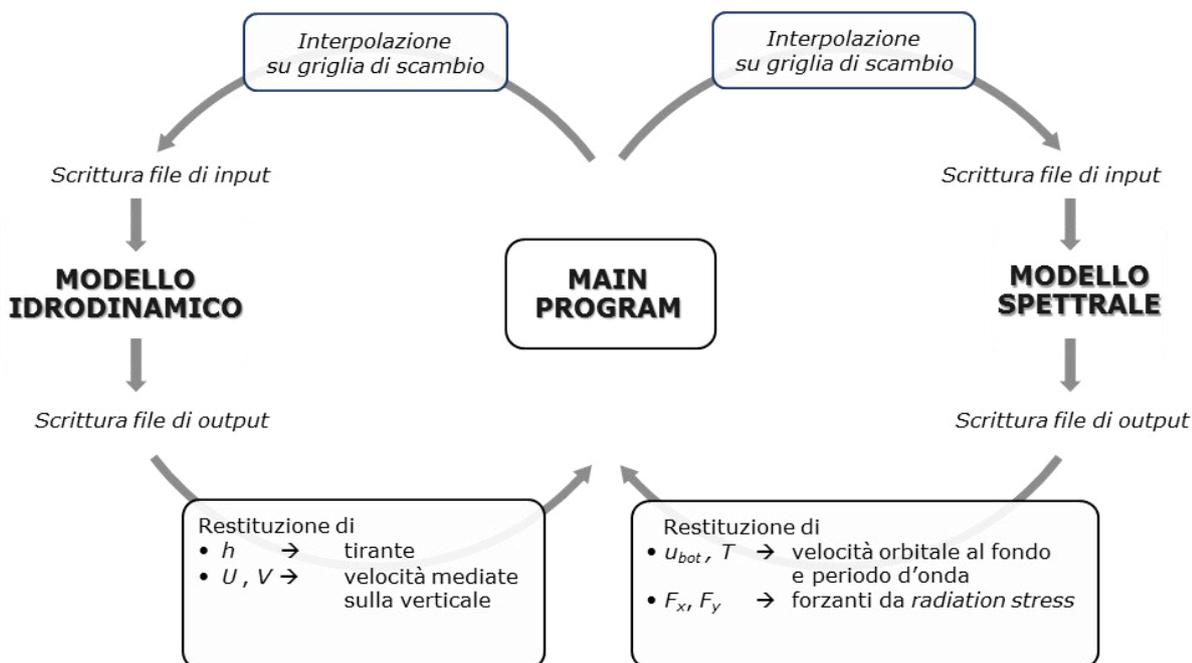
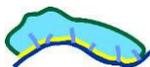


Figura 3.25. Schema di accoppiamento dei modelli idrodinamico e spettrale.

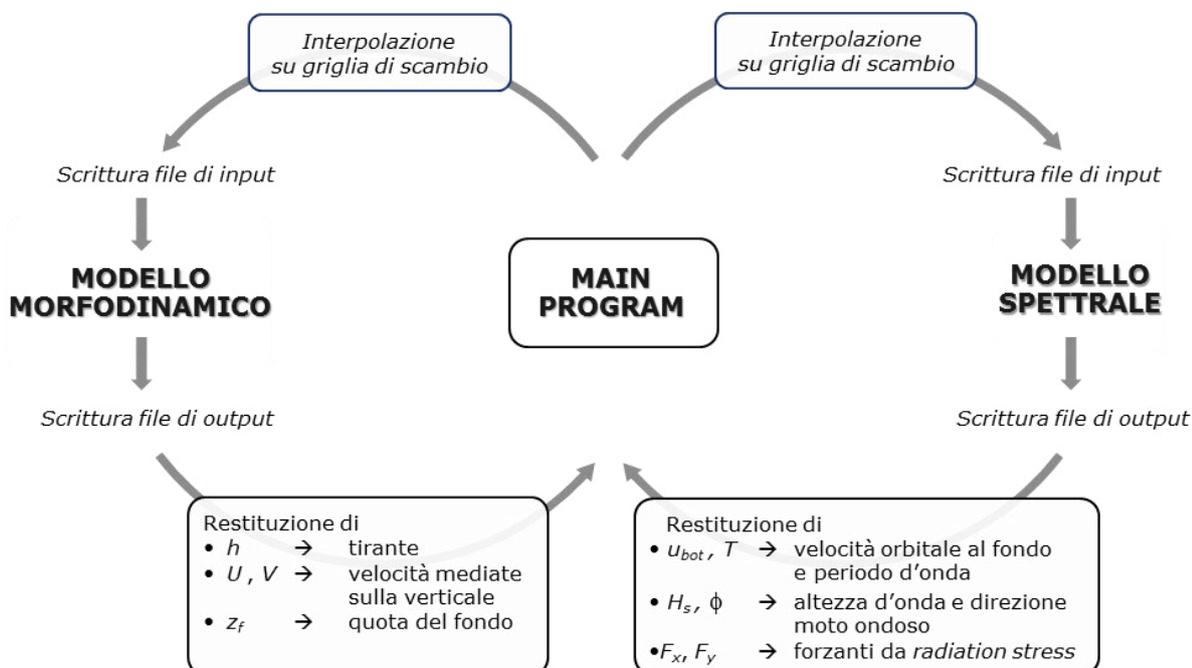
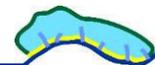


Figura 3.26. Schema di accoppiamento dei modelli morfodinamico e spettrale.



### 3.4. Modello idrodinamico delle correnti e del moto ondoso

Di seguito vengono descritte le fasi di preparazione dei modelli idrodinamici e i risultati delle simulazioni effettuate.

#### 3.4.1. Definizione e quotatura delle mesh idrodinamiche

Il primo passaggio, fondamentale per effettuare lo studio e la modellazione idrodinamica delle correnti in laguna, successivo e subordinato alla scelta del modello numerico di integrazione delle equazioni del moto, ha previsto la ricostruzione della geometria dell'area di interesse, realizzando la griglia di calcolo strutturata.

È stata disegnata dunque una maglia bidimensionale a celle quadrangolari (*mesh*), aventi dimensioni scelte sulla base del grado di dettaglio con cui si voleva cogliere l'andamento delle principali caratteristiche morfologiche e idrauliche all'interno del dominio.

Sulla *mesh* così definita sono state impostate le successive simulazioni.

La procedura ha previsto i seguenti passaggi:

1. definizione della superficie e suddivisione in elementi quadrangolari;
2. quotatura della *mesh*;
3. definizione delle classi di scabrezza e calibrazione dei relativi coefficienti di resistenza.

La superficie coperta dalla *mesh* idrodinamica è di circa 144 Km<sup>2</sup> con un numero di elementi prossimo ai 183000. Si riporta un'immagine generale dell'area discretizzata in Figura 3.27.

I contorni della *mesh* sono stati tracciati seguendo per quanto possibile, dei limiti ritenuti idraulicamente invalicabili, che comprendono sia le arginature esterne che quelle interne a perimetrazione delle valli da pesca.

Queste ultime, il cui scambio idrico con la laguna è regolato da apposite paratoie, non rientrano pertanto nel dominio di simulazione per l'analisi del campo di moto idrodinamico.

Diversamente le barene sono state trattate come parte integrante dell'area di studio.

Particolare cura e dettaglio sono stati posti nel riprodurre la fitta rete di canali interni, sia principali che secondari.

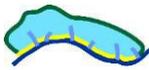
Questa attenzione, necessaria per una corretta riproduzione del campo di moto, ha vincolato la dimensione minima degli elementi, pari a circa 1.5 m, come si evince dai dettagli nei riquadri di Figura 3.27.

La dimensione longitudinale delle celle che discretizzano i canali, secondo il flusso di percorrenza e di quelle rappresentative delle piane tidali, è decisamente maggiore e raggiunge un valore massimo di circa 130 m.

I dati utilizzati per l'assegnazione delle quote agli elementi della *mesh* sono diversi:

- punti quotati dai rilievi effettuati per la redazione della carta batimetrica della laguna (Figura 3.9);
- rilievi di dettaglio dei canali alle bocche di Lignano, S. Andrea, Porto Buso e Grado;
- rilievi di dettaglio dei canali interni alla laguna, in particolare Coron, Taiada e Barbana;
- CTRN scala 1:5000;
- DTM della Protezione Civile con passo 1 m;
- aerofotogrammi, ortofoto e immagini satellitari a supporto visivo della cartografia e dei punti quotati.

I punti della carta batimetrica coprono con sufficiente dettaglio i canali e in generale le parti cui competono



quote negative rispetto allo zero di riferimento IGM 42, mentre non risultano adeguatamente rappresentative per le zone emerse.

Ad esse, infatti, è stata attribuita, in sede di redazione della carta batimetrica, una quota fissa e costante di 24 cm, scelta come una buona media dal confronto con la carta idrografica di Dorigo (1966).

Al fine di disporre di una migliore rappresentatività di tali zone, soprattutto dal punto di vista della ricostruzione del campo idrodinamico, si è proceduto ad una correzione certosina delle quote attraverso l'integrazione con la carta tecnica e il DTM della protezione civile.

Come per il modello idrodinamico delle correnti, anche il modello che descrive e riproduce i fenomeni di generazione delle onde da vento in laguna e della loro successiva propagazione all'interno della stessa, necessita della definizione di una *mesh* di calcolo e sua successiva quotatura.

SWAN, il modello spettrale impiegato nell'ambito di questo lavoro, richiede come anticipato nella descrizione al paragrafo 3.3, una *mesh* non strutturata ad elementi triangolari.

A partire dai contorni della *mesh* idrodinamica sopra descritta, è stata realizzata una nuova griglia di calcolo che conta circa 161000 elementi.

I lati dei triangoli hanno una dimensione variabile dai 30 ai 100 m, compatibilmente con la necessità di tener conto, da una parte, delle variazioni del fondo in corrispondenza dei canali e dall'altra delle dimensioni minime di applicabilità del modello numerico.

La quotatura di questa *mesh* è stata effettuata sulla base delle fonti utilizzate per la precedente.

Il modello accoppiato necessita inoltre di definire un *frame* di scambio, ossia un grigliato regolare su cui vengono interpolati i dati di passaggio tra il modello idrodinamico e quello spettrale.

Il *frame* copre l'intera superficie lagunare con passo di discretizzazione di 50 m.

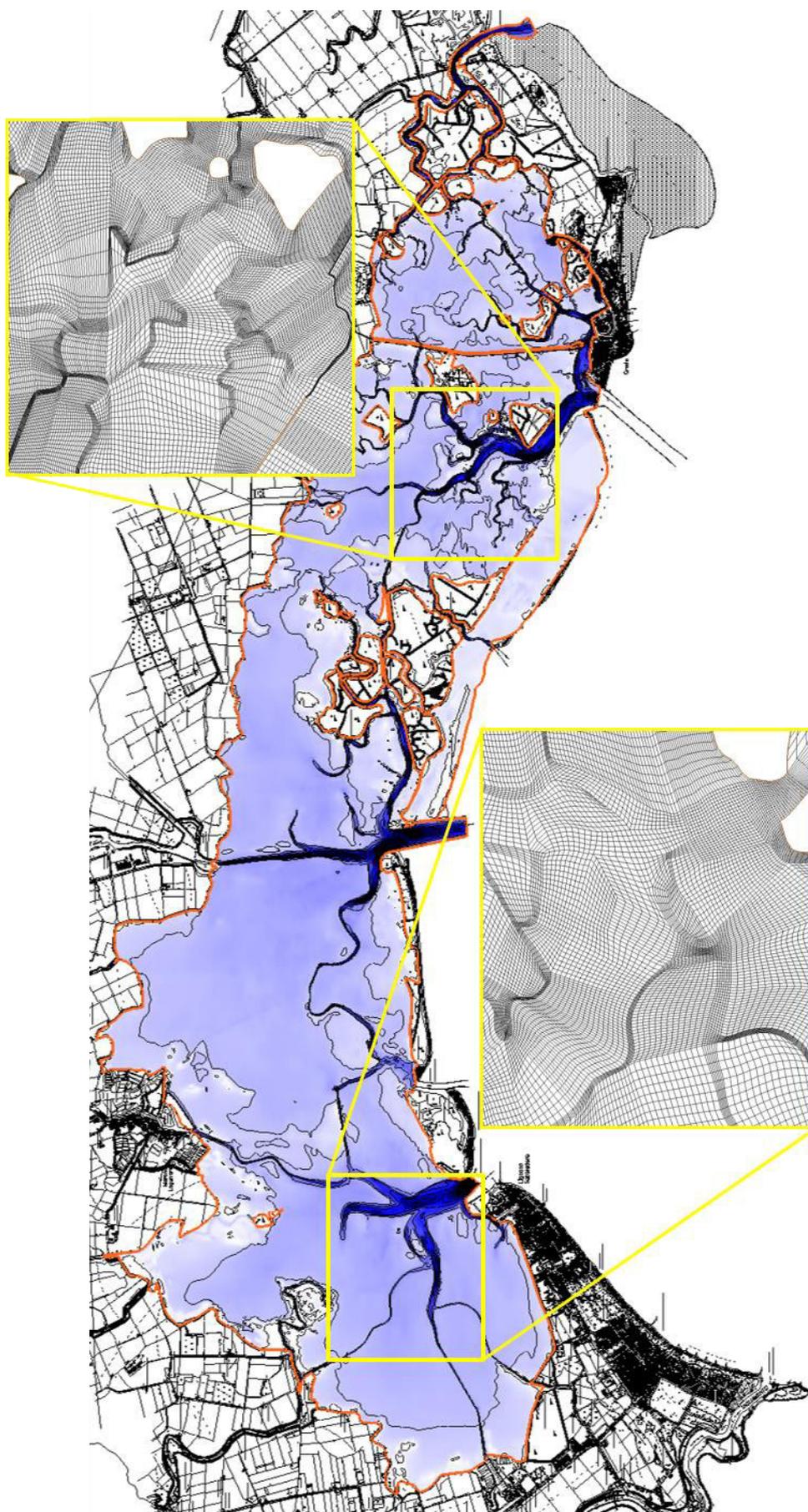
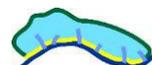
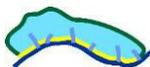


Figura 3.27. Superficie discretizzata per le simulazioni idrodinamiche e dettagli della mesh.



### 3.4.2. Individuazione delle classi di scabrezza e calibrazione dei coefficienti di resistenza

Definita la griglia di calcolo, nella sua rappresentazione geometrica, è stato necessario attribuire un codice materiale ad ogni singola cella, che ha comportato una successiva scelta e assegnazione della scabrezza al fondo, sintetizzata nel coefficiente di Manning.

L'approccio seguito in questo studio, è consistito nella definizione di macro-classi omogenee che tenessero conto della granulometria, forme di fondo e della presenza o meno di vegetazione, che si traduce in un effetto resistivo diverso di cui la corrente risente al fondo.

Nello specifico sono state scelte quattro classi di scabrezza, distinguendo, come evidenziato in Figura 3.28, fra:

1. i canali lagunari, in cui le profondità e le velocità di deflusso raggiungono i valori massimi;
2. le piane tidali, sommerse, con profondità media dell'ordine di 1 m;
3. le aree in cui sono presenti estese praterie di fanerogame;
4. le zone emerse.

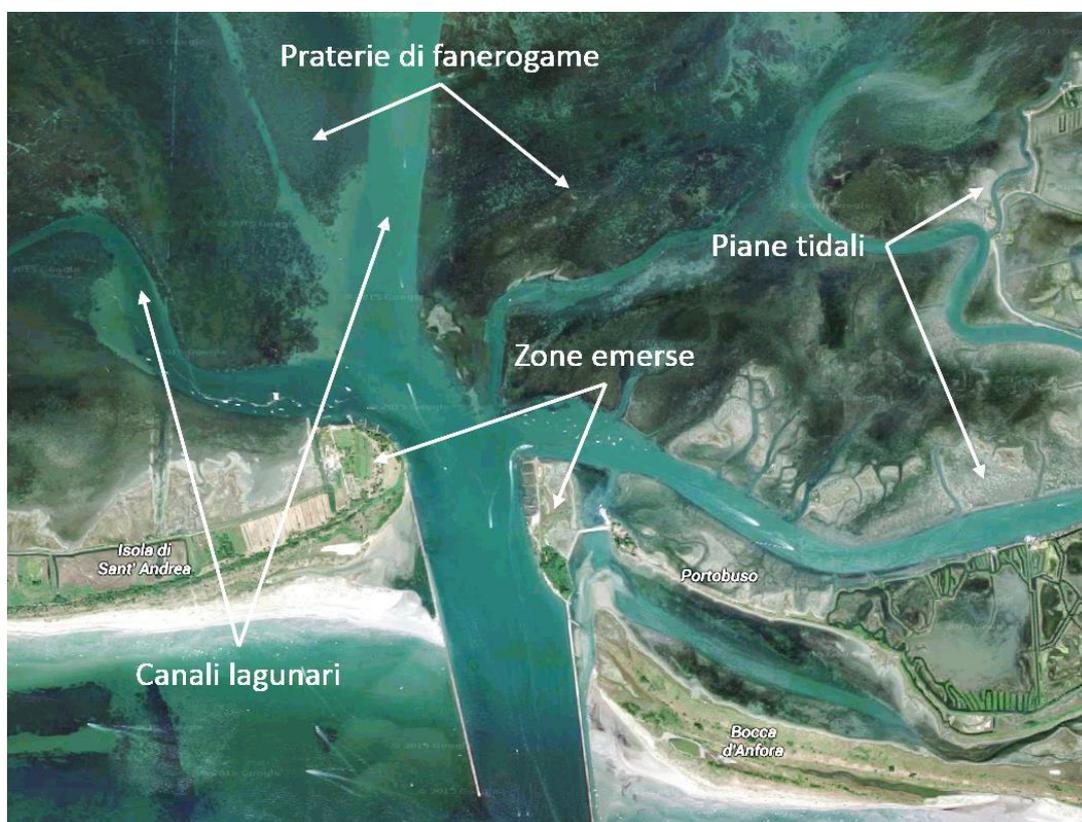


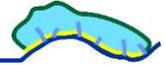
Figura 3.28. Definizione delle classi di scabrezza.

L'assegnazione di ciascuna cella della *mesh* idrodinamica ad una delle quattro classi così definite, di cui la sintesi in Figura 3.29, è stata effettuata utilizzando:

- ortofoto, aerofotogrammi e immagini satellitari;
- la carta batimetrica;
- la mappa di distribuzione delle fanerogame (Figura 3.10);
- i dati mareografici rilevati in laguna.

La definizione del coefficiente di resistenza da associare a ciascuna classe di scabrezza è un'operazione delicata e complessa, che presuppone un processo iterativo di taratura dei valori, sulla base del *best fitting* statistico con i dati mareografici.

Sono stati presi, quali valori di partenza dei coefficienti di Manning, i dati di riferimento per la laguna di



Venezia.

La procedura di calibrazione ha comportato numerose simulazioni, della durata ciascuna di 10 ore su una macchina a 12 core, nelle quali sono stati fatti variare i coefficienti di Manning delle quattro classi.

Le simulazioni hanno riprodotto il campo di moto idrodinamico all'interno della laguna durante un'oscillazione di marea di 48 ore di cui, in Figura 3.30, si riporta la registrazione del mareografo di Grado. Questa particolare serie temporale è stata scelta in maniera tale da essere contemporaneamente presente nel maggior numero di mareografi in laguna (Figura 3.31), sia sulle bocche che interni.

Nello specifico si è riusciti ad estrarre i dati di:

- Lignano,
- Porto Buso,
- Grado,
- Tre Canai,
- Bivio Taglio,
- Bivio Morgo,
- Sdrettolo.

Per ciascuna simulazione sono stati confrontati i livelli ottenuti con quelli rispettivi misurati dallo strumento, quantificando sia il ritardo di fase dell'oscillazione che la differenza nell'ampiezza.

Sono stati infine scelti i coefficienti di Manning che hanno minimizzato gli scarti rispetto alle due grandezze indicate.

Si riportano i grafici finali di confronto ottenuti, nelle figure 3.32 – 3.39 di seguito inserite.

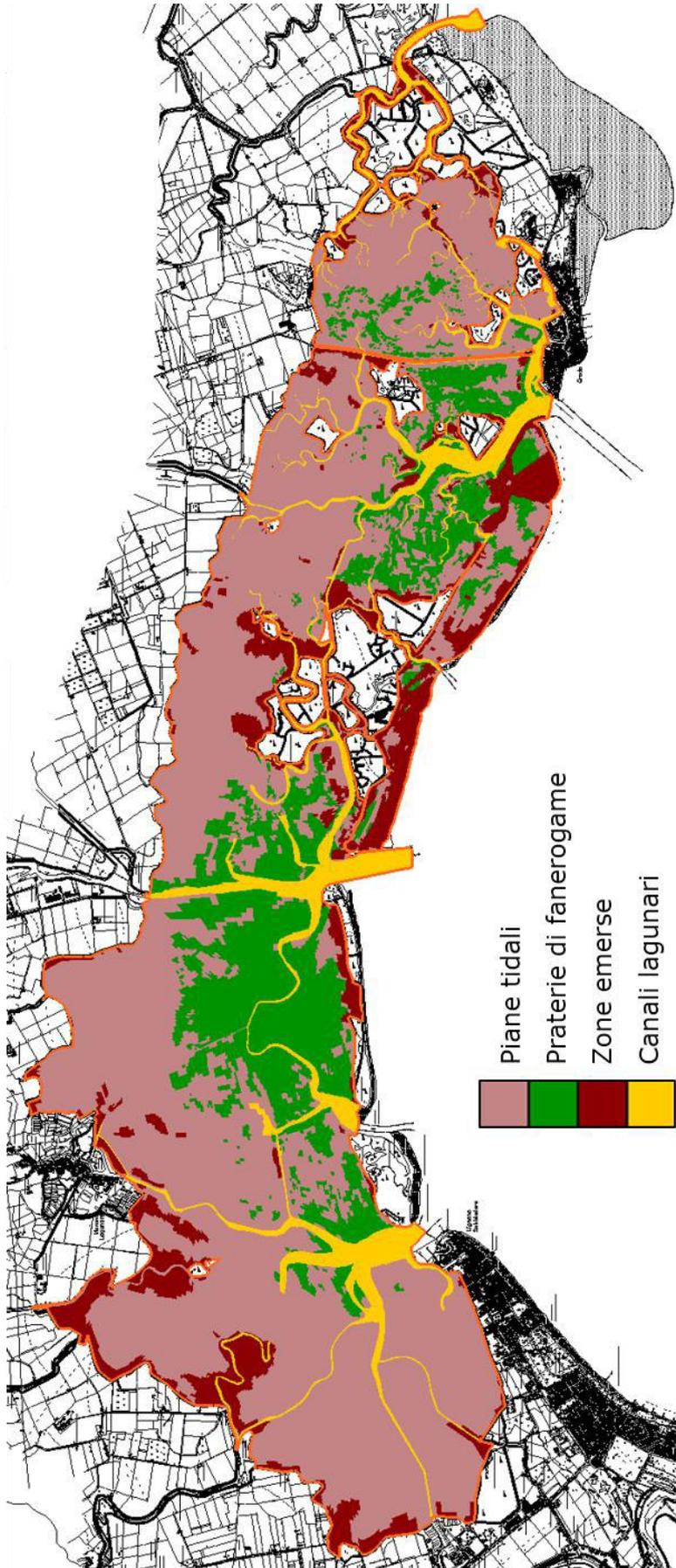
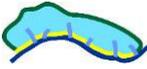


Figura 3.29. Assegnazione degli elementi della mesh alle classi di scabrezza.

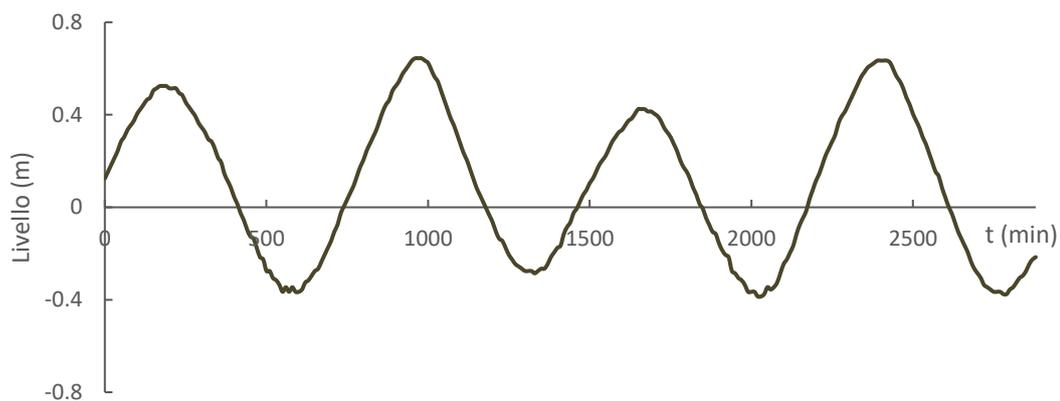
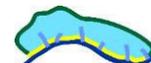


Figura 3.30. Oscillazione di marea registrata dal mareografo di Grado e simulata per la procedura di calibrazione delle scabrezze.

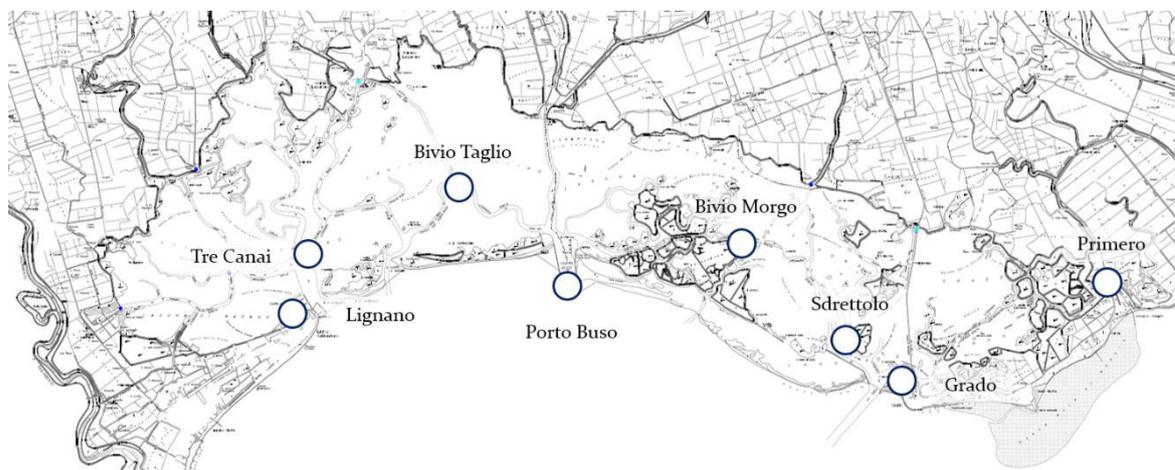


Figura 3.31. Mareografi su cui sono stati fatti i confronti per la procedura di calibrazione delle scabrezze.

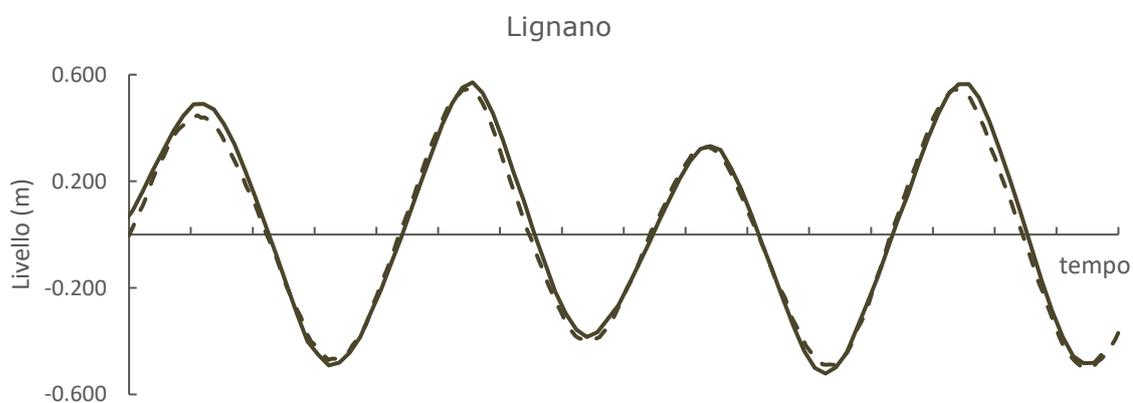


Figura 3.32. Confronto tra livello misurato (linea tratteggiata) e simulato (linea continua) a Lignano.

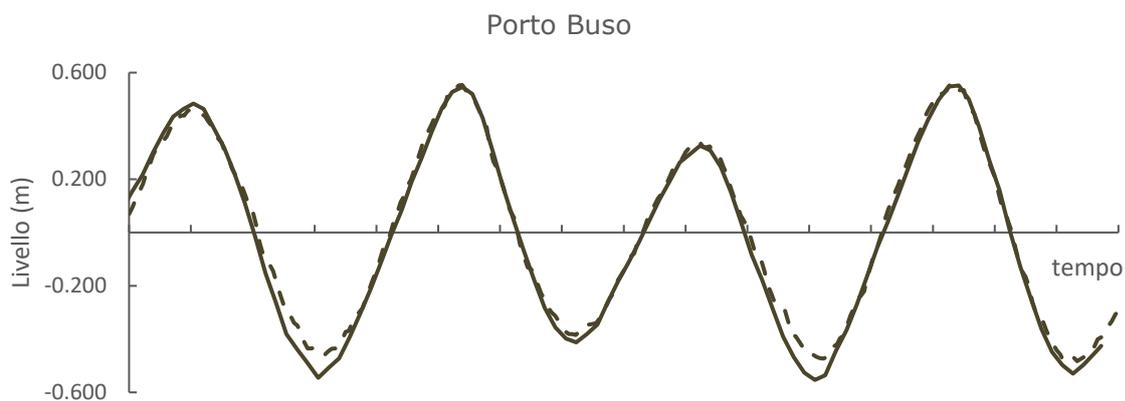
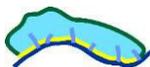


Figura 3.33. Confronto tra livello misurato (linea tratteggiata) e simulato (linea continua) a Porto Buso.

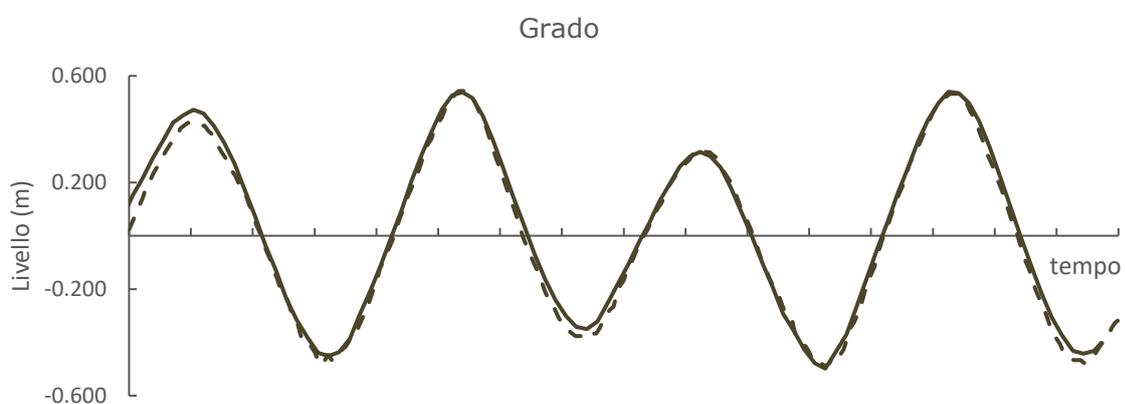


Figura 3.34. Confronto tra livello misurato (linea tratteggiata) e simulato (linea continua) a Grado.

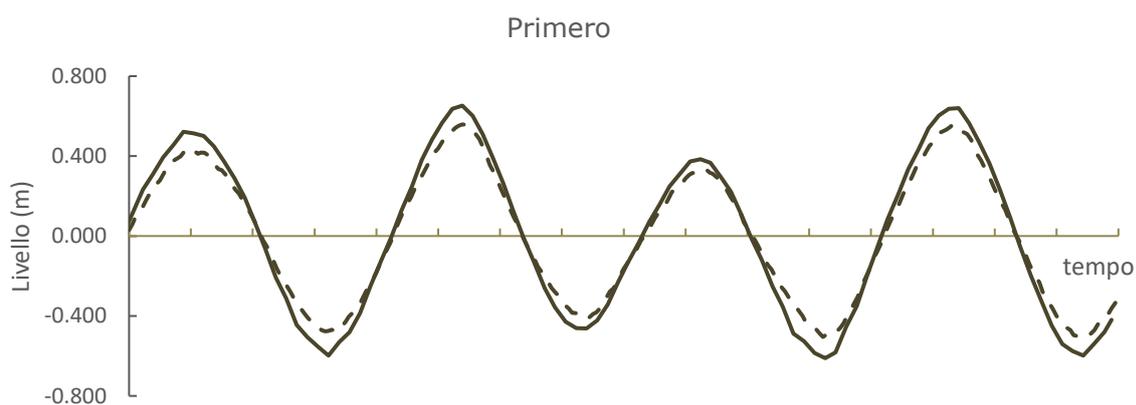


Figura 3.35. Confronto tra livello misurato (linea tratteggiata) e simulato (linea continua) a Primero.

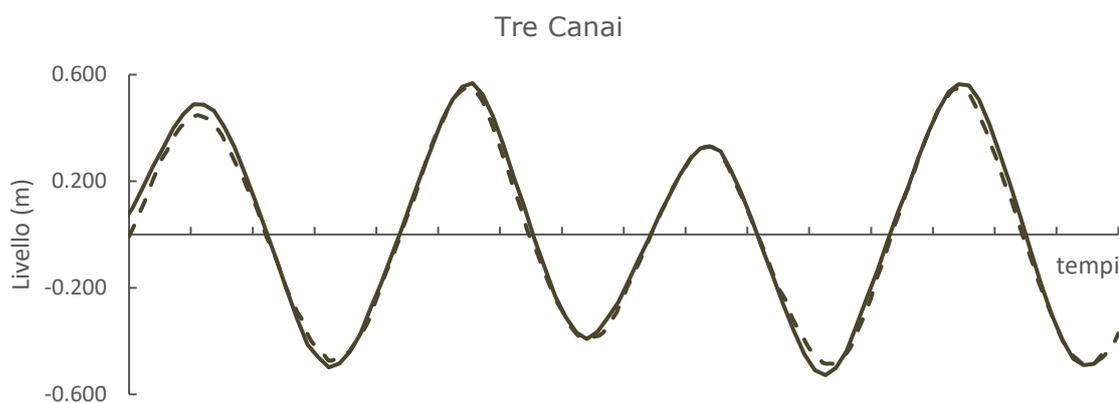
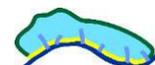


Figura 3.36. Confronto tra livello misurato (linea tratteggiata) e simulato (linea continua) a Tre Canai.

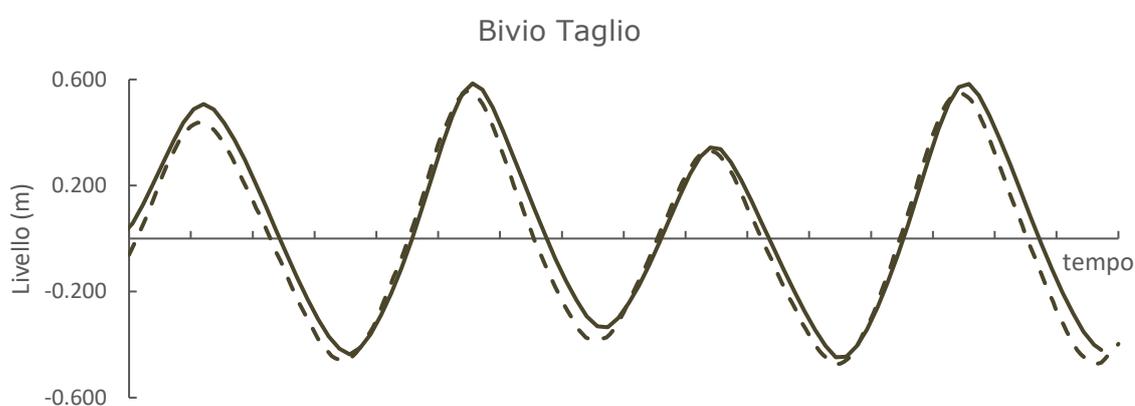


Figura 3.37. Confronto tra livello misurato (linea tratteggiata) e simulato (linea continua) a Bivio Taglio.

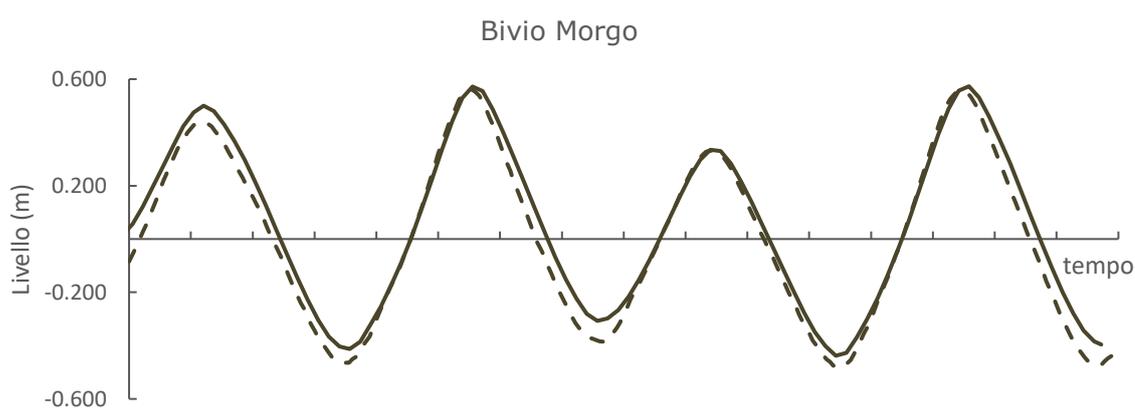


Figura 3.38. Confronto tra livello misurato (linea tratteggiata) e simulato (linea continua) a Bivio Morgo.

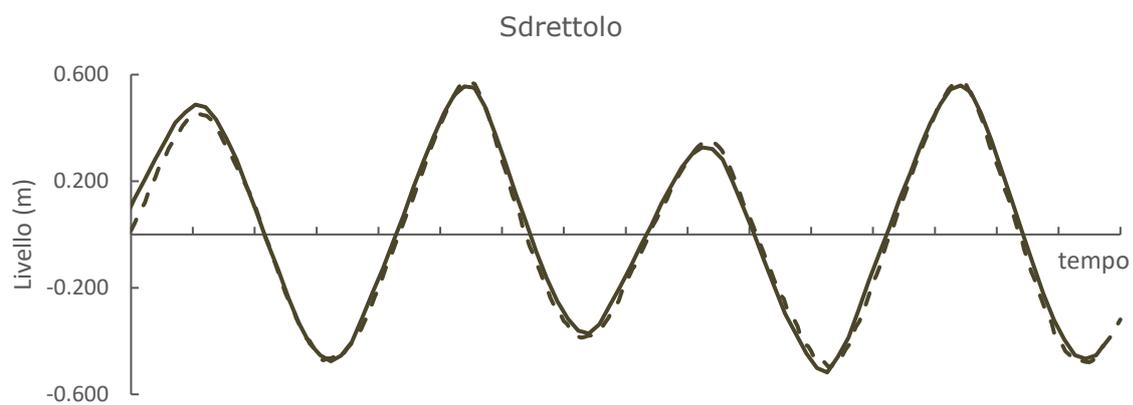
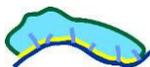
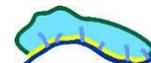


Figura 3.39. Confronto tra livello misurato (linea tratteggiata) e simulato (linea continua) a Sdrettolo.



### 3.5. Condizioni al contorno di marea e vento

Al fine di interpretare l'evoluzione morfologica della laguna su un'estensione temporale annuale, compatibile con la durata degli interventi, è importante stabilire opportune condizioni al contorno di marea e vento.

Tali condizioni devono rappresentare le forzanti che agiscono in laguna mediamente nell'intero anno e da cui dipendono direttamente sia l'intensità delle correnti di marea che delle oscillazioni indotte dal vento. Con questo proposito sono state condotte ulteriori analisi sui dati, sia mareografici che anemometrici, per definire valori utili alla corretta applicazione e utilizzo del modello.

Per ricostruire una forma della marea rappresentativa dell'anno medio, sia in termini di ampiezza che periodicità, è stata effettuata preventivamente un'analisi *zero-crossing* di tipo marittimo sulle registrazioni disponibili di Grado e Trieste.

La metodologia adottata è consistita nell'individuare tutti gli attraversamenti dello zero, ossia il livello medio calcolato sulla serie mareografica e il segno della pendenza della retta tangente alla registrazione in quel dato punto.

Per ciascuna oscillazione compresa tra due successivi attraversamenti con segno concorde, sono stati individuati i livelli massimi, detti livelli di cresta  $\eta_{cresta,j}$  e minimi, indicati come livelli di cavo  $\eta_{cavo,j}$ . La loro differenza restituisce l'altezza dell'oscillazione di marea  $H_j$ .

Un riassunto schematico della procedura adottata è riportato in Figura 3.40, dove sono stati indicati con una croce gli attraversamenti dello zero con derivata positiva e con un punto quelli aventi derivata negativa.

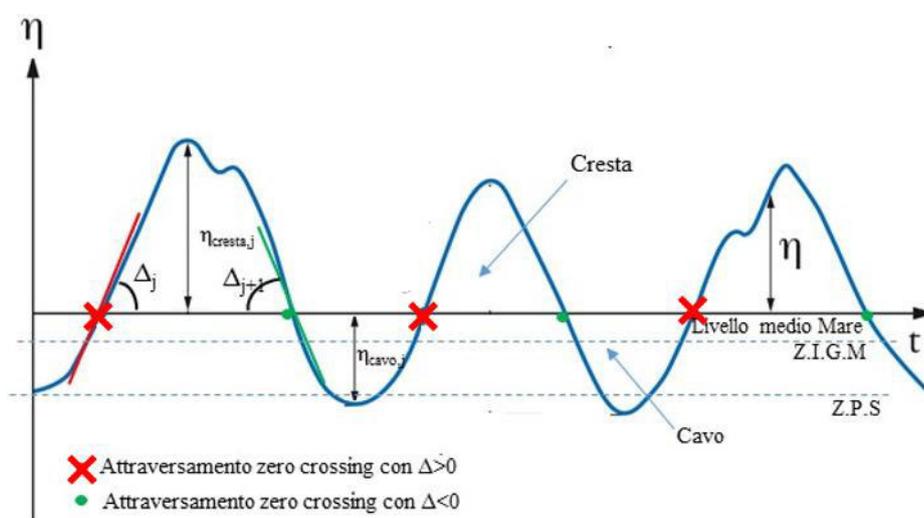


Figura 3.40. Riassunto grafico del metodo zero-crossing.

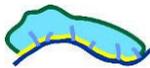
Una cresta è individuata da un attraversamento a derivata positiva seguito da uno a derivata negativa, viceversa per un cavo.

Mediando per ciascun anno di registrazione, le serie di creste e cavi così determinati, sono stati valutati il livello medio di cresta e di cavo, rispettivamente indicati come  $\eta_{cresta,medio}$  e  $\eta_{cavo,medio}$ . Sempre per i singoli anni, sono stati identificati i massimi delle altezze delle oscillazioni,  $H_{max} = \max\{H_j\}$ .

I risultati delle analisi sono riportati sinteticamente in Tabella 3.11, relativamente al periodo comune compreso fra gli anni 1991 e 2014.

L'analisi comparativa evidenzia un buon accordo tra i livelli registrati a Grado e quelli registrati a Trieste, che vanta una maggiore storicità.

Questa conclusione ha supportato la scelta di utilizzare come rappresentativi i livelli del mareografo di Grado, per la definizione della marea media annua da assegnare al modello idrodinamico.



La seconda parte dell'analisi dei dati mareografici è consistita nell'applicare tecniche derivanti dall'analisi dei segnali per l'individuazione dello spettro medio dall'intera durata dei 24 anni disponibili.

Utilizzando l'algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) ottimizzato per il calcolo della trasformata discreta di Fourier, sono stati ricavati gli spettri annuali dei segnali registrati, sia in termini di ampiezza che di fase. Si riconosce che tali spettri presentano tre picchi principali, nelle frequenze corrispondenti ai periodi di 12 ore, 12.5 ore e 24 ore, che si associano alle seguenti componenti armoniche: solare semidiurna principale (S2), lunare semidiurna principale (M2) e lunisolare declinazione diurna (K1).

Da un'analisi di insieme su ciascuna delle tre componenti di frequenza, sono stati determinati gli spettri medi di ampiezza e fase.

Infine, attraverso una procedura inversa e l'utilizzo dell'antitrasformata di Fourier, è stato generato il segnale relativo a tali spettri medi, che corrisponde alla forma della marea media annua cercata.

L'andamento dei livelli, avente complessivamente una periodicità di circa 13 giorni e le caratteristiche armoniche delle tre componenti sopra determinate, sono riportati in Figura 3.41.

Tabella 3.11. Livelli medi di cavo e cresta e altezze d'onda di marea massime, ottenute per ciascun anno, con l'analisi zero-crossing.

Anno	GRADO			TRIESTE		
	$\eta_{\text{cavo,medio}}$	$\eta_{\text{cresta,medio}}$	$H_{\text{max}}$	$\eta_{\text{cavo,medio}}$	$\eta_{\text{cresta,medio}}$	$H_{\text{max}}$
1991	-0.40119	0.37253	1.42951	-0.4057	0.37142	1.42183
1992	-0.4012	0.36529	1.48792	-0.40795	0.36735	1.50615
1993	-0.40621	0.37802	1.41916	-0.40904	0.37089	1.50436
1994	-0.39683	0.37795	1.4515	-0.3962	0.36871	1.43466
1995	-0.38657	0.37093	1.44859	-0.38447	0.3648	1.56287
1996	-0.38729	0.37536	1.66059	-0.38435	0.36681	1.63675
1997	-0.39132	0.37877	1.68129	-0.39213	0.37038	1.66902
1998	-0.38918	0.36692	1.54838	-0.38715	0.36035	1.54002
1999	-0.39139	0.37319	1.48872	-0.39139	0.36647	1.68219
2000	-0.39701	0.37209	1.4531	-0.39371	0.36664	1.50281
2001	-0.40436	0.38355	1.46866	-0.39936	0.37647	1.48875
2002	-0.39879	0.37467	1.46023	-0.40579	0.37138	1.4388
2003	-0.40807	0.38126	1.47038	-0.41931	0.38004	1.50235
2004	-0.416	0.3849	1.4879	-0.4173	0.384	1.47945
2005	-0.41462	0.38151	1.52974	-0.41626	0.37662	1.54343
2006	-0.40816	0.38335	1.36312	-0.41163	0.37397	1.36587
2007	-0.40316	0.37708	1.51972	-0.41159	0.37196	1.57638
2008	-0.41099	0.38167	1.71706	-0.41575	0.37383	1.73659
2009	-0.41479	0.38995	1.75005	-0.4158	0.38127	1.60052
2010	-0.39239	0.38342	1.56456	-0.4047	0.37915	1.56608
2011	-0.39353	0.37519	1.37912	-0.39234	0.36517	1.36926
2012	-0.39611	0.3779	1.43774	-0.39149	0.37386	1.4583
2013	-0.39194	0.36909	1.37967	-0.37001	0.34854	1.29988
2014	-0.38125	0.37306	1.41988	-0.35809	0.34371	1.36041
<b>MEDIA</b>	<b>-0.39926</b>	<b>0.37699</b>	<b>1.50069</b>	<b>-0.39923</b>	<b>0.36974</b>	<b>1.51028</b>

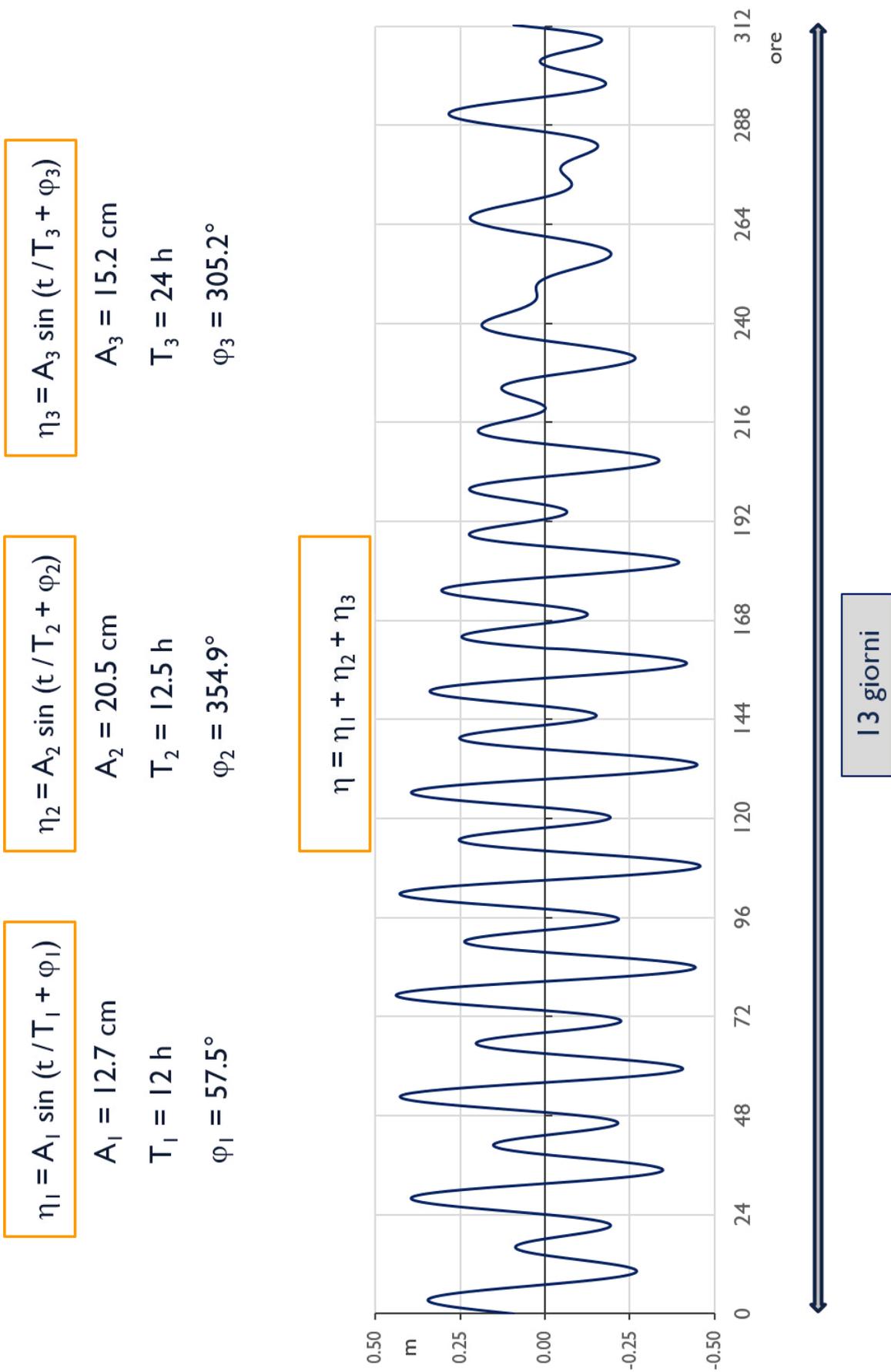
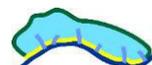
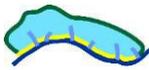


Figura 3.41. Forma della marea rappresentativa dell'anno medio.



Per definire una successione di venti che sia rappresentativa delle condizioni anemometriche in laguna nell'arco di un anno, i dati di vento relativi ai due poli di Lignano e Grado, individuati durante la prima fase di analisi, sono stati sintetizzati in tabelle a doppia entrata.

Fissate le classi di direzione e intensità, si sono suddivise le misure registrate dagli strumenti in base all'appartenenza congiunta a ciascuna loro combinazione, formulando le tabelle a doppia entrata sia in termini di frequenze assolute, ossia del numero complessivo di eventi che ricade in un determinato intervallo di velocità e direzione, sia in termini di frequenze relative, ossia come percentuale sul numero complessivo di dati.

Nella Tabella 3.12 si forniscono informazioni relative alle misure registrate rispettivamente dall'anemometro di Lignano Darsena, gestito da OSMER.

Nello specifico si riportano l'intervallo temporale in anni di disponibilità del dato, il numero di dati complessivo, il numero di calme e di dati anomali e infine la frequenza di campionamento della misura.

Le calme sono identificate da valori di velocità inferiori ai 0.5 m/s, mentre i dati anomali ricadono al di fuori dell'intervallo stabilito in fase di validazione o risultano mancanti di una fra le due componenti di direzione o intensità.

Segue la tabella a doppia entrata delle frequenze assolute (Tabella 3.13) relativa all'anemometro di Lignano.

Analogamente si riportano le sintesi per le registrazioni della stazione di Grado Meteo gestita dall'ISPRA (Tabelle 3.14 e 3.15).

Una rappresentazione grafica delle tabelle a doppia entrata, di più immediata comprensione, consiste nei diagrammi polari, suddivisi in settori direzionali e cerchi concentrici corrispondenti alle frequenze relative espresse in termini percentuali.

In figura 3.42 si riportano i diagrammi polari di entrambe le stazioni anemometriche di Lignano e Grado e la convenzionale rosa dei venti.

Come si può osservare le frequenze maggiori si riferiscono a venti provenienti dai settori di Bora, Levante e Scirocco. Si è deciso per un'analisi a priori omnidirezionale, non volendo escludere nessuna delle possibili direzioni di provenienza del vento e dunque dei potenziali effetti che questo avrebbe sulle componenti idrodinamiche lagunari.

Per un'ulteriore conferma di quanto trovato, la medesima analisi è stata effettuata sui dati anemometrici ricostruiti mediante modellazione numerica dall'Arpa, riscontrando un'ottima corrispondenza.

Successivamente alle distribuzioni in frequenza, sono state ricavate, per entrambi i poli di Lignano e Grado, le curve di durata delle velocità che esprimono mediamente, per ciascuna intensità di vento, i giorni in un anno in cui essa viene uguagliata o superata.

La necessità di sintetizzare ulteriormente i dati al fine di ricavare una caratterizzazione anemometrica media annua, ha costretto all'identificazione di opportune classi, la cui durata e intensità sono state stimate sulla base delle curve definite sopra.

Con questo principio e tenuto conto che velocità superiori ai 14 m/s si registrano solo mediamente per poche ore nell'arco dell'anno, sono state scelte come rappresentative le velocità dei 0 m/s, 3 m/s, 6 m/s e 10 m/s, come evidenziato in Figura 3.43.

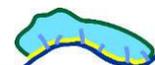


Tabella 3.12. Sintesi dei dati dell'anemometro di Lignano.

Periodo analizzato	Numero totale di dati	Numero di calme	Numero di dati anomali	Frequenza di campionamento
2000-2014	131472	1637	466	1 ora

Tabella 3.13. Tabella a doppia entrata dei dati di vento registrati a Lignano.

Vel (m/s)/ Dir (°N)	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	Tot
0°	1459	2747	1156	360	159	61	38	14	2	1	0	0	5997
11.25°	1043	3063	1730	516	186	93	40	16	6	1	1	0	6695
22.5°	1061	3796	3228	953	331	137	41	24	6	0	1	0	9578
33.75°	880	3773	3672	1160	390	149	44	21	2	0	0	0	10091
45°	694	3150	3426	1243	429	170	49	25	7	0	0	0	9193
56.25°	653	2783	2881	1191	512	197	86	24	7	0	1	0	8335
67.5°	634	2280	2333	1519	887	479	207	104	21	4	0	0	8468
78.75°	513	1394	1214	1177	1021	714	350	171	51	10	3	0	6618
90°	536	927	721	782	658	552	310	130	37	13	7	2	4675
101.25°	595	967	605	501	374	251	128	42	18	4	3	0	3488
112.5°	774	1140	534	336	176	78	28	8	3	0	0	0	3077
123.75°	705	1089	475	202	82	25	8	1	1	0	0	0	2588
135°	681	1255	362	149	54	9	3	0	0	0	0	0	2513
146.25°	585	1129	301	156	62	32	8	0	0	0	0	0	2273
157.5°	614	1436	493	246	136	67	15	2	3	0	0	0	3012
168.75°	629	1694	902	381	180	99	30	1	1	0	0	0	3917
180°	571	2061	1311	456	124	38	8	0	0	0	0	0	4569
191.25°	538	1878	1375	281	60	5	0	0	0	0	0	0	4137
202.5°	512	1566	1105	191	26	6	0	0	0	0	0	0	3406
213.75°	491	1055	531	85	29	5	1	0	0	0	0	0	2197
225°	540	997	376	109	33	3	2	0	0	0	0	0	2060
236.25°	718	1136	448	100	15	1	0	0	0	0	0	0	2418
247.5°	985	1314	353	45	14	0	0	0	0	0	0	0	2711
258.75°	977	855	151	24	6	5	1	0	0	0	0	0	2019
270°	964	752	132	19	4	1	0	0	0	0	0	0	1872
281.25°	873	711	115	34	3	1	0	0	0	0	0	0	1737
292.5°	892	709	101	18	8	0	0	0	0	0	0	0	1728
303.75°	800	643	109	29	6	2	0	0	1	0	0	0	1590
315°	769	639	109	35	10	2	1	0	0	0	0	0	1565
326.25°	764	786	138	28	13	7	2	0	0	0	0	0	1738
337.5°	954	949	214	56	19	15	5	2	1	0	0	1	2216
348.75°	899	1402	375	119	49	28	11	4	1	0	0	0	2888
<b>Tot</b>	<b>24303</b>	<b>50076</b>	<b>30976</b>	<b>12501</b>	<b>6056</b>	<b>3232</b>	<b>1416</b>	<b>589</b>	<b>168</b>	<b>33</b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>129369</b>

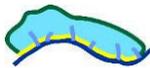


Tabella 3.14. Sintesi dei dati dell'anemometro di Grado.

Periodo analizzato	Numero totale di dati	Numero di calme	Numero di dati anomali	Frequenza di campionamento
1998-2014	365984	4474	16930	30 minuti

Tabella 3.15. Tabella a doppia entrata dei dati di vento registrati a Grado.

Vel (m/s)/ Dir (°N)	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	Tot
0°	3831	8939	2213	490	156	53	16	2	1	0	0	0	15701
11.25°	3593	12602	3460	605	201	58	27	14	0	0	0	0	20560
22.5°	4025	16344	2934	561	188	53	17	3	0	0	0	0	24125
33.75°	4374	14045	1880	459	126	19	2	0	0	0	0	0	20905
45°	3900	13991	5128	2181	1096	297	55	4	0	0	0	0	26652
56.25°	3416	11001	8282	5455	2819	1076	226	34	6	0	0	0	32315
67.5°	3081	7879	7329	4402	1654	347	62	4	2	0	0	0	24760
78.75°	2146	3946	4347	2694	829	117	26	1	0	0	0	0	14106
90°	1813	2718	2130	1206	430	104	12	0	0	0	0	0	8413
101.25°	1269	1885	1185	561	211	80	11	0	0	0	0	0	5202
112.5°	1413	2540	1236	372	115	89	23	0	0	0	0	0	5788
123.75°	1491	3164	1095	389	103	42	29	5	0	0	0	0	6318
135°	1530	2990	1142	592	280	125	53	6	1	0	0	0	6719
146.25°	1594	2586	1221	795	533	294	153	51	10	11	3	0	7251
157.5°	1632	2701	1599	1297	950	612	329	76	19	6	0	0	9221
168.75°	1606	2524	1743	1456	1188	600	248	68	11	1	0	0	9445
180°	1822	3217	2236	1749	906	290	77	21	1	0	0	0	10319
191.25°	1703	3397	2213	1176	352	134	43	5	2	2	0	0	9027
202.5°	1842	4554	2457	793	210	92	30	4	4	0	0	0	9986
213.75°	1679	4318	2056	467	231	77	30	6	2	0	0	0	8866
225°	1595	4321	2210	412	156	40	4	2	0	0	0	0	8740
236.25°	1555	3947	2278	450	117	24	8	0	0	1	0	0	8380
247.5°	1467	3535	2085	355	93	15	5	0	0	0	0	0	7555
258.75°	1148	1937	1028	113	50	9	2	0	1	0	0	0	4288
270°	1317	1630	502	61	34	9	2	3	0	0	0	0	3558
281.25°	1216	1554	521	76	20	6	4	0	0	0	0	0	3397
292.5°	1393	1790	405	49	18	9	6	3	1	1	0	0	3675
303.75°	1547	2126	354	61	29	6	2	3	0	1	0	0	4129
315°	1664	2251	443	54	28	13	6	5	3	0	0	0	4467
326.25°	1795	2319	450	94	47	20	7	2	1	0	0	0	4735
337.5°	2257	3489	682	187	100	32	14	6	5	0	0	0	6772
348.75°	2578	4796	1308	299	139	51	20	12	2	0	0	0	9205
<b>Tot</b>	<b>67292</b>	<b>159036</b>	<b>68152</b>	<b>29911</b>	<b>13409</b>	<b>4793</b>	<b>1549</b>	<b>340</b>	<b>72</b>	<b>23</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>344580</b>

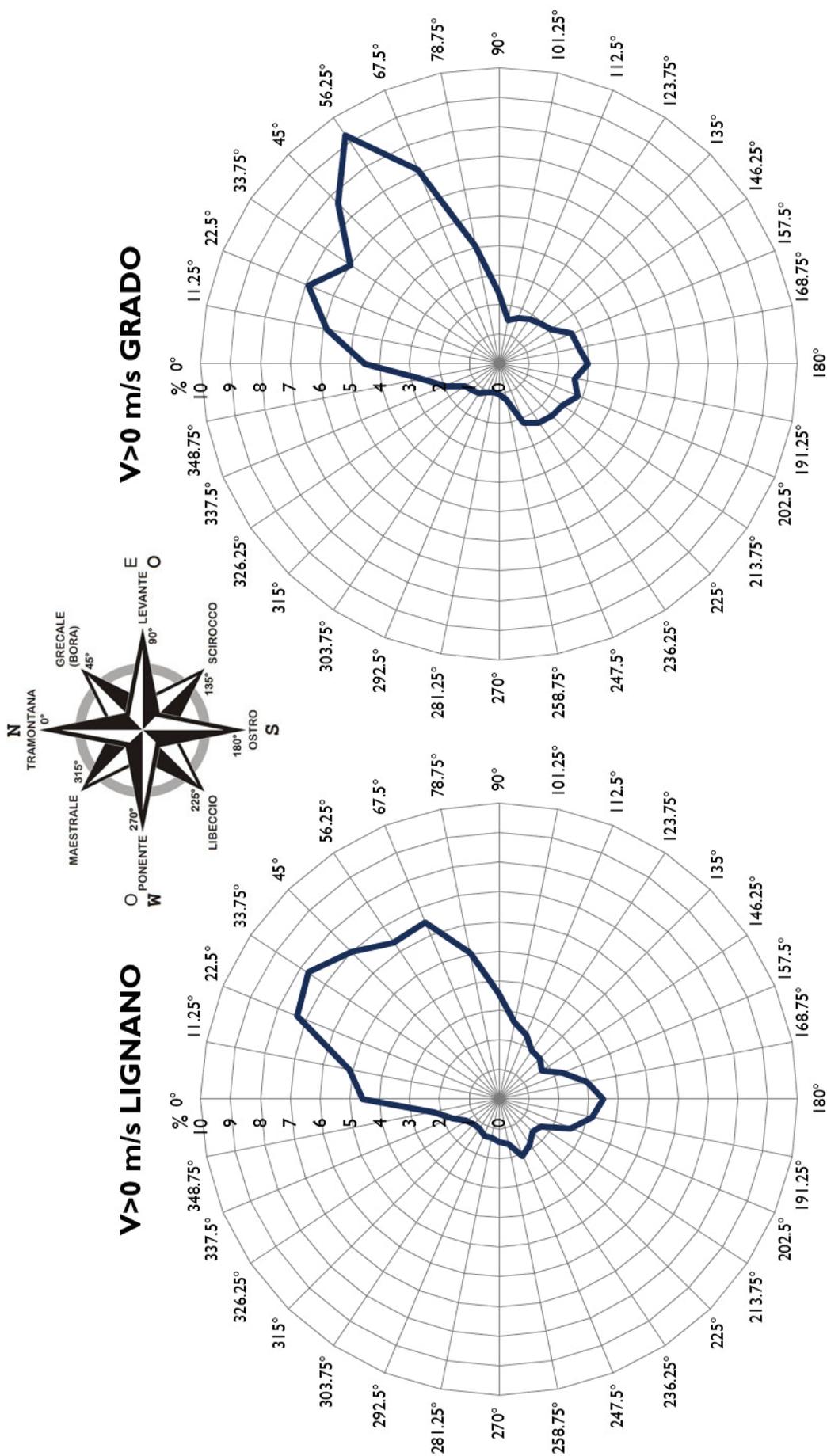


Figura 3.42. Diagrammi polari delle distribuzioni di frequenza relativa delle velocità registrate dagli anemometri di Lignano e Grado.

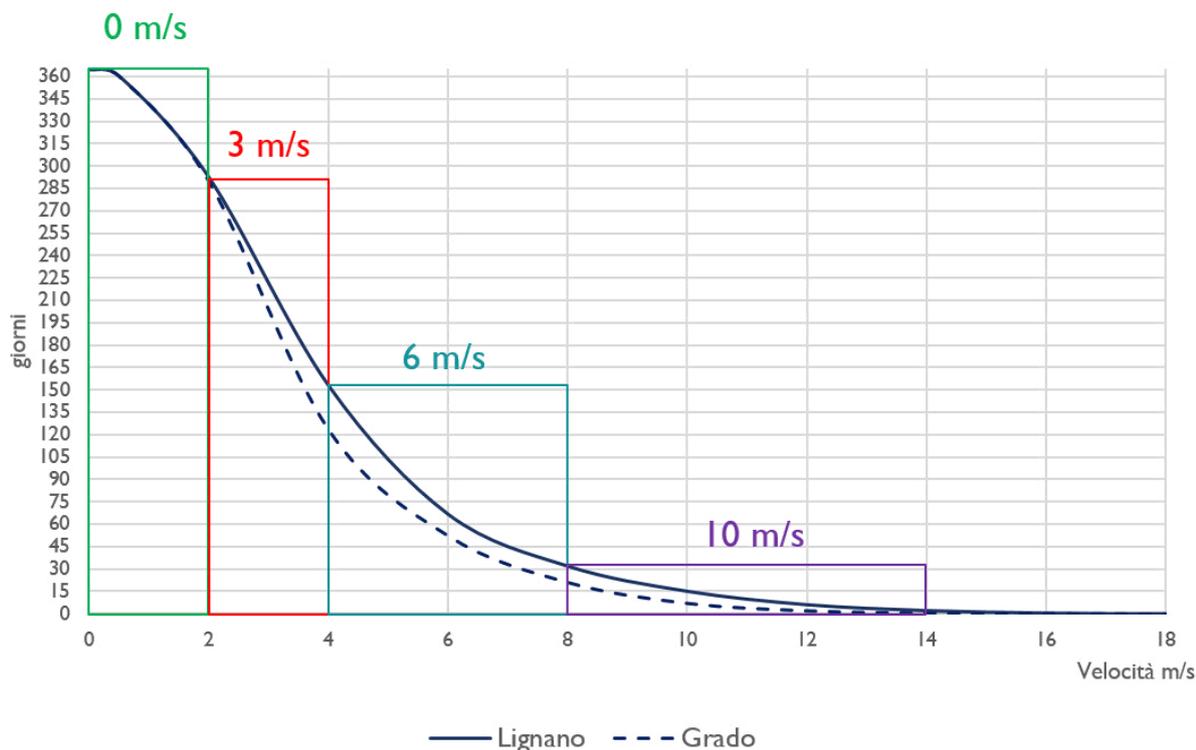
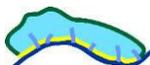


Figura 3.43. Curve di durata delle velocità del vento per i due poli di Lignano e Grado e suddivisione in classi di intensità rappresentative.

Il procedimento di sintesi seguito per le intensità del vento è stato applicato anche per le direzioni di provenienza, definendo le quattro classi principali:

1. Tramontana,
2. Bora e Levante,
3. Scirocco,
4. Ponente e Libeccio,

schematizzate in Figura 3.44.

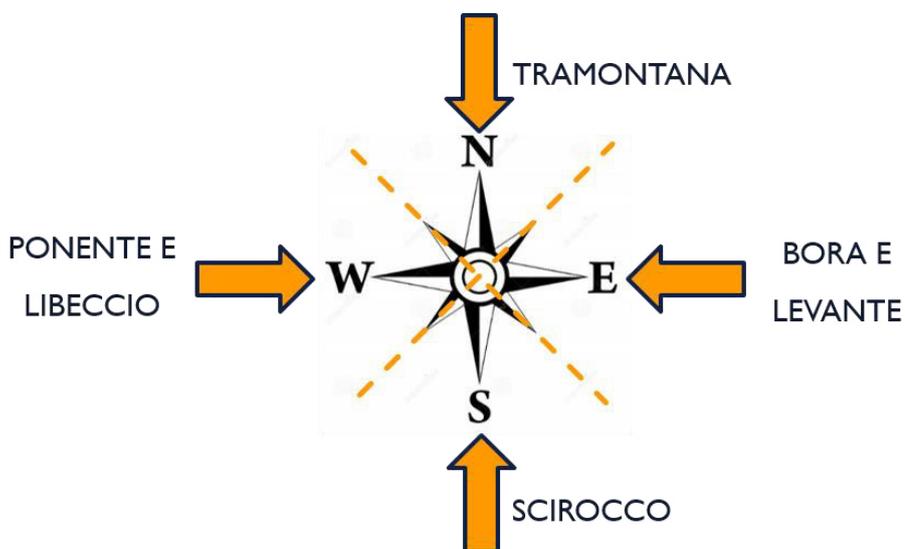
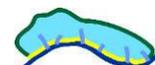


Figura 3.44. Direzioni rappresentative del vento.



### 3.6. Simulazioni idrodinamiche

Al fine di individuare le aree più sollecitate o esposte a una possibile rimozione del sedimento dal fondo e successivo trasporto, sono state effettuate una serie di simulazioni idrodinamiche con l'obiettivo di evidenziare la distribuzione delle tensioni massime al fondo in combinazione di moto ondoso e marea. Questo studio, preliminare alle simulazioni morfodinamiche successive, è orientato a una prima revisione critica delle proposte di consolidamento e ricostruzione delle barene previste dal piano di gestione della laguna di Marano e Grado (Ottobre 2011) e l'identificazione di nuove aree che possono essere considerate strategiche ai fini del nuovo piano morfologico.

Gli scenari analizzati con il modello accoppiato idrodinamico - spettrale, derivano da una combinazione delle classi di velocità e direzione del vento individuate rispetto alla forma della marea media annua.

Preso la massima delle oscillazioni nella marea media, avente durata di 25 ore, sono state effettuate le simulazioni assegnando ciascuna classe di velocità nelle quattro direzioni, per un totale di dodici configurazioni, riassunte in Tabella 3.16.

Tabella 3.16. Classi di tensione critica per la laguna di Marano e Grado.

velocità	direzione	durata (h)	durata simulazione (h)	
3 m/s	0°	25	8	32
	90°	25	8	
	180°	25	8	
	270°	25	8	
6 m/s	0°	25	8	32
	90°	25	8	
	180°	25	8	
	270°	25	8	
10 m/s	0°	25	8	32
	90°	25	8	
	180°	25	8	
	270°	25	8	

Per ciascuna delle configurazioni simulate, sono state analizzate le distribuzioni di tensione massima al fondo e il campo di corrente, selezionando gli istanti di massima intensità. Questo studio ha consentito di ottenere una prima valutazione sull'esposizione di alcune aree alla mobilitazione ed eventuale trasporto di sedimenti.

Si riporta a titolo di esempio, in Figura 3.45, una sintesi dei risultati in corrispondenza della barena a bordo canale lungo l'allacciante di Sant'Andrea, rimandando per ulteriori dettagli al lavoro che verrà descritto nel capitolo 7, completo e integrato con il contributo dello studio morfologico – evolutivo della laguna.

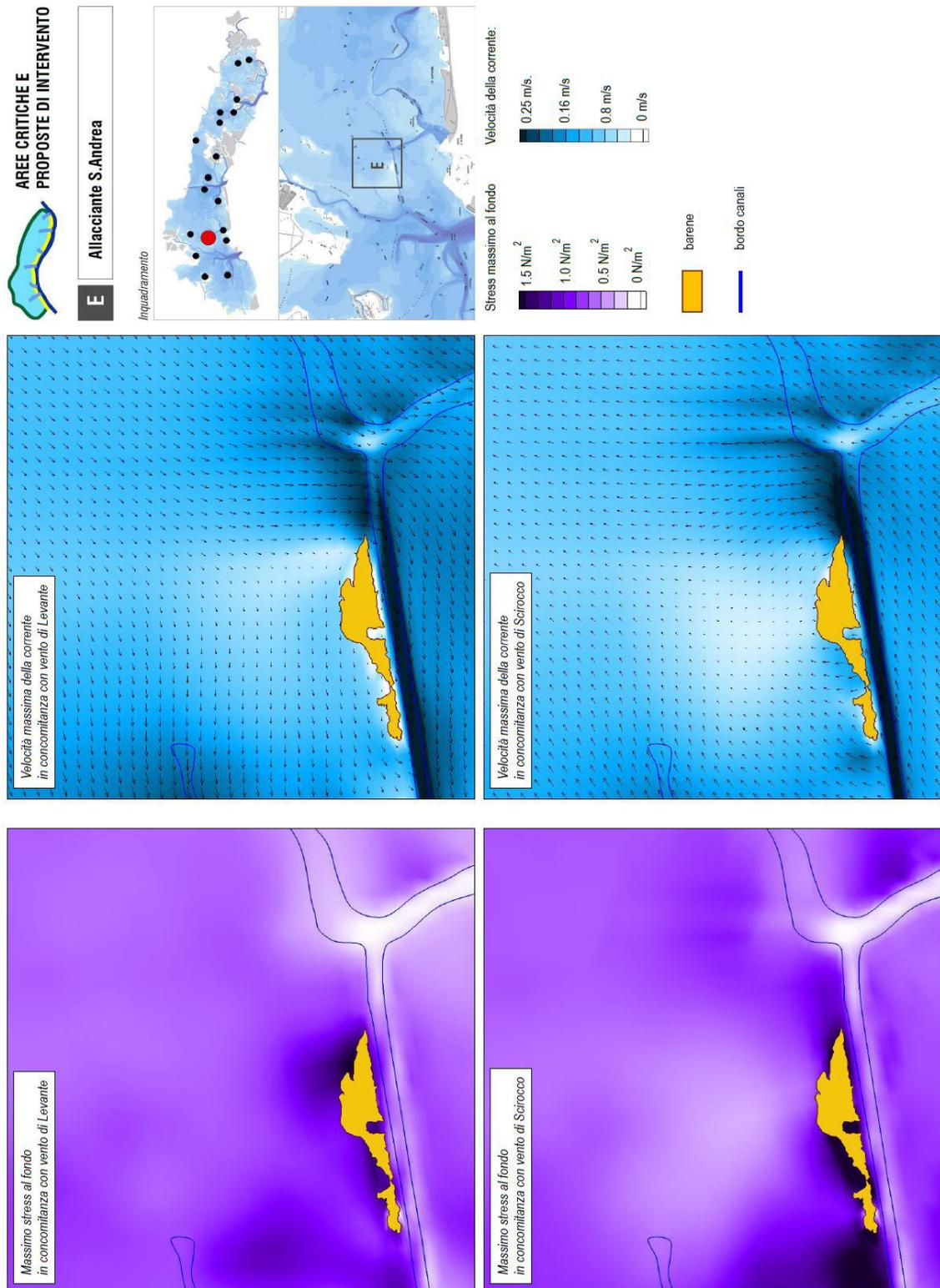
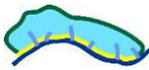
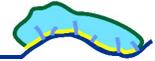


Figura 3.45. Tensione massima al fondo e campo di corrente in concomitanza dei venti di Levante e di Scirocco.



## 4. Analisi degli aspetti morfologico – evolutivi (a cura di UniTS)

### 4.1. Introduzione

Dal punto di vista geologico le lagune sono forme del paesaggio di breve durata la cui esistenza è minacciata dalle modifiche di diversi fattori ambientali come l'innalzamento del livello del mare, l'attività tettonica locale, l'apporto di sedimento dall'entroterra, la dinamica litorale e non da ultimo le attività antropiche.

La formazione delle attuali lagune è avvenuta prevalentemente durante una fase di innalzamento del livello del mare nel periodo Olocenico o Pleistocenico grazie ai processi costieri che hanno portato alla generazione delle *isole barriera* ossia dei cordoni, in genere sabbiosi, di forma allungata che separano le lagune dal mare (Kjerfve, 1994).

Una volta che una laguna si è formata le principali forze che ne condizionano le morfologie sono: il mare (tramite onde e maree), l'apporto delle acque continentali dai fiumi e il vento, responsabile del trasporto eolico dei sedimenti. Nel sistema laguna – isole barriera quindi si possono individuare diverse morfologie (Figura 4.1.) che sono il risultato dell'interazione delle suddette forzanti.

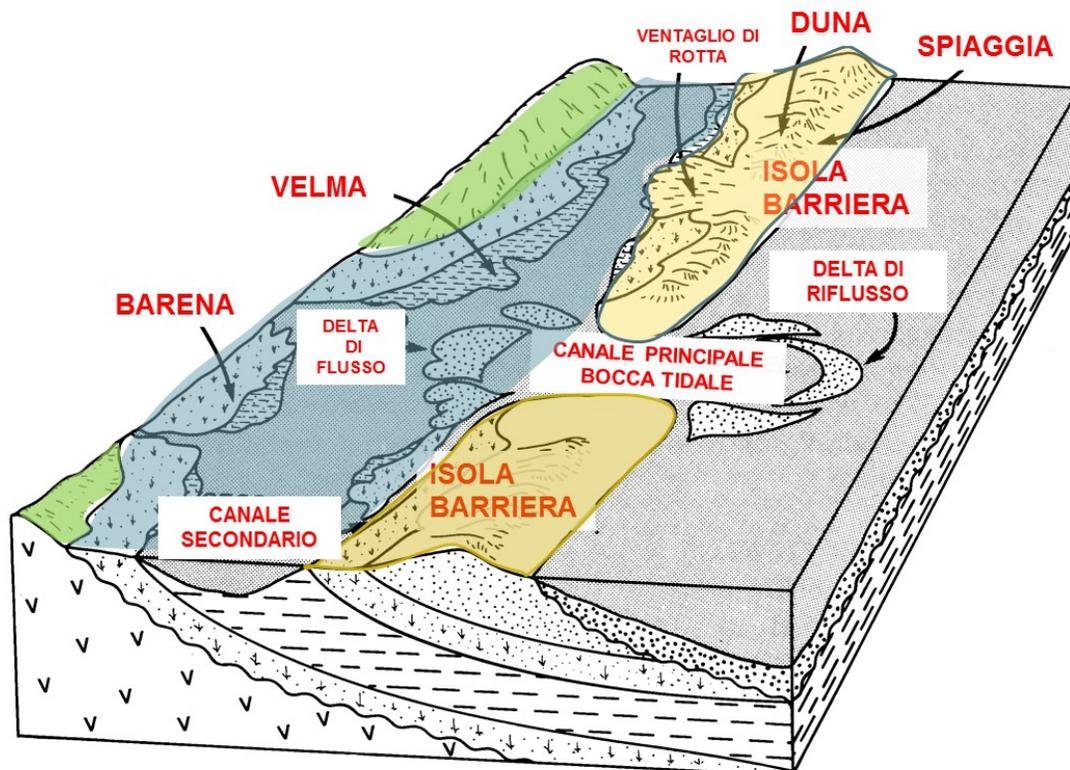
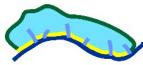


Figura 4.1. Elementi morfologici tipici di un sistema lagunare influenzato dalle onde e dalle correnti di marea (Nichols, 2009): barena (salt marsh), piana tidale o velma (tidal flat), spiaggia (beach), isola barriera (barrier island), ventaglio di rotta (washover fan), bocca tidale (tidal inlet), canale principale (main channel), canale secondario (secondary channel), delta di flusso (flood delta), delta di riflusso (ebb delta).



Il motore principale della morfodinamica interna alla laguna è la marea e la definizione stessa di laguna dipende dall'esistenza di questa forzante. Infatti il modello "classico" differenzia le diverse parti che compongono una laguna proprio in base all'elevazione che hanno rispetto ai differenti livelli che la marea assume nella sua oscillazione periodica (

Figura 4.2).

Secondo questa classificazione si riconoscono differenti zone:

- Al di sopra del livello delle alte maree di sizigia vi sono le isole interne alla laguna (si tratta frequentemente di forme ereditate della paleo-pianura alluvionale pre-esistente all'innalzamento del livello del mare) e le isole barriera che delimitano la laguna verso mare.
- Tra le alte maree di sizigia e il livello medio del mare si collocano le barene, le cui porzioni meno elevate, chiamate barena bassa, sono poste al di sotto del livello medio delle alte maree.
- Al di sotto del livello medio del mare ed entro il livello medio delle basse maree si identificano le piane tidali (o velme) e i canali secondari (ghebi).
- Nella porzione sempre sommersa si identificano i fondali lagunari subtidali, le bocche tidali e i canali lagunari principali.

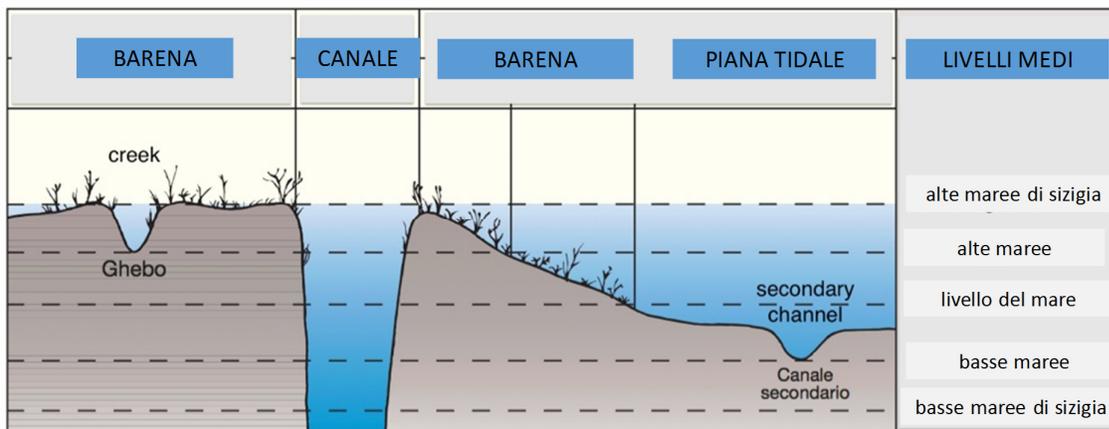


Figura 4.2. Schema delle più importanti morfologie lagunari e loro relazioni con i livelli di marea (da Albani et al., 1984 ridisegnata).

Il cordone sabbioso (isole barriera) che separa la laguna dal mare aperto è dominato dai processi costieri (onde, vento); può avere diversa ampiezza e vi sono identificabili diversi ambienti: *spiaggia*, *dune embrionali*, *dune vegetate*, *barene di retrobarriera*. I processi legati al moto ondoso possono rompere la continuità del cordone litorale determinando la formazione di rotte con morfologie peculiari chiamate *ventagli di wash-over*; inoltre quest'ultimo processo può portare ad una migrazione del cordone verso terra (Nichols, 2009). Le varie porzioni di isola barriera sono separate dalle *bocche tidali* che consentono lo scambio mareale tra la laguna e il mare.

L'Alto Adriatico, grazie ad una particolare combinazione tra energia delle onde (bassa) ed escursione di marea (relativamente alta), è l'unica area in cui sono presenti sistemi lagunari veri e proprio in tutto il bacino del Mediterraneo, con lo sviluppo di vere e proprie morfologie tidali come le barene ad esempio. In epoca antecedente alle grandi opere di bonifica idraulica essi erano assai diffusi ed estesi a nord del Delta del Po mentre oggi la laguna di Venezia e quella di Marano e Grado sono le più estese e importanti rimaste.

L'evoluzione dei sistemi lagunari dipende da un mutuo bilancio tra apporti sedimentari e tendenza all'annegamento causata dall'innalzamento del livello del mare. Il bilancio sedimentario di una laguna è una complessa interazione tra apporti da mare (attraverso i sistemi costieri) o da terra (apporti fluviali) e perdite (attraverso le bocche).



Se gli apporti sedimentari eguagliano o superano le perdite la laguna è in grado di adattarsi all'innalzamento del livello del mare "costruendo" nuove morfologie o innalzando le quote di quelle esistenti. Se il bilancio sedimentario si presenta in deficit si assiste invece a un processo di "marinizzazione" (Nichols, 1989).

L'innalzamento relativo del livello del mare attualmente in atto a livello globale e nell'Alto Adriatico (Lambeck et al., 2004; Antonioli et al., 2009) associato agli scarsi apporti solidi fluviali tendono a portare le lagune a un processo di "marinizzazione" che le vede approfondirsi nel tempo e mostrare una progressiva "semplificazione morfologica".

Questo fenomeno, già noto e quantificato per la Laguna di Venezia e parzialmente riconosciuto anche per quella di Marano e Grado induce la perdita di superfici a barena, l'approfondimento dei fondali lagunari a bassa profondità, la scomparsa dei canali secondari e l'interrimento di quelli principali (Fontolan et al., 2012; Sarretta et al., 2010; Bezzi, 2014). Per una corretta conoscenza e gestione dell'ambito lagunare questi processi richiedono di essere quantificati sia a scala di intera laguna che di singolo bacino e localizzato con buon dettaglio in termini spaziali.

La determinazione del bilancio sedimentario di una laguna è però un'operazione estremamente complessa che richiederebbe la disponibilità di un'enorme mole di dati di diversa natura (che come vedremo non sono disponibili nel nostro caso) o l'utilizzo di raffinati modelli fisici che prevedono la semplificazione dei processi reali e presenta sempre comunque un elevato grado di incertezza.

Una delle metodologie indirette possibili è il confronto delle topo-batimetrie realizzate in due diversi momenti storici con lo scopo di ottenere un bilancio volumetrico che possa essere assunto quale bilancio sedimentario. È quest'ultima la metodologia utilizzata nel presente lavoro.

Nel contempo la tendenza trasgressiva incide sul comportamento evolutivo dei banchi e delle isole barriera che delimitano la laguna verso mare, il cui stato morfodinamico è dipendente dall'interazione tra le correnti lungo riva, l'innalzamento del livello del mare, l'azione della marea e il moto ondoso associato agli eventi meteomarinari a elevata energia.

Il presente capitolo ha quindi lo scopo di determinare lo stato morfologico ed evolutivo dell'intera laguna e dei principali elementi morfologici che la compongono attraverso una serie di analisi cartografiche e spaziali in GIS e di descriverne lo stato e l'evoluzione.

Nel paragrafo 4.2 vengono elencati e brevemente descritti i principali strumenti conoscitivi disponibili e utilizzati per questa parte dello Studio.

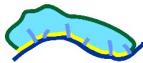
Il paragrafo 4.3 grazie al confronto delle batimetrie dei fondali lagunari nel 1964 e nel 2009 affronta una descrizione morfologica quantitativa della laguna attuale e di quella passata attraverso l'analisi dell'ipsometria, ossia della distribuzione statistica delle profondità dei fondali lagunari suddivise in classi di profondità. Presenta inoltre la *Carta delle differenze altimetriche* per l'intera laguna grazie alla quale è possibile individuare nello specifico le aree stabili nel tempo e quelle soggette a erosione o accumulo.

Il paragrafo 4.4 utilizza l'analisi spaziale in GIS per giungere a una quantificazione del bilancio sedimentario della laguna e ne analizza i risultati.

I paragrafi 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 sono dedicati alla descrizione sia qualitativa che quantitativa dei diversi elementi che compongono la complessa struttura geomorfologica della laguna e della loro evoluzione nel tempo.

Nel paragrafo 4.11 vengono tratte una serie di considerazioni conclusive e viene presentata la *Carta degli elementi morfologici della laguna di Marano e Grado*. Si pongono così le basi per una corretta formulazione degli ambiti di protezione e delle strategie e priorità gestionali che verranno affrontate al capitolo 6.

In questa sede sono raccolti diversi dati messi a disposizione dagli Enti e sono nel contempo stati ripresi, rielaborati e integrati i risultati delle indagini svolte nel corso degli ultimi anni grazie alle collaborazioni condotte tra gli Enti (Arpa FVG e Regione FVG) e le Università (UniTS in particolare). L'integrazione dei dati già a disposizione è stata fatta anche attraverso sopralluoghi e rilievi sul terreno.



## 4.2. Strumenti conoscitivi

### 4.2.1. Carte storiche

Per l'area lagunare sono disponibili alcune cartografie storiche quali ad esempio la carta topografica del *Militargeographisches Institut* del 1894, in scala 1:25000, riportata nello *Studio dell'Assetto Fluviale e Costiero della Regione Friuli Venezia Giulia* (Regione Autonoma del Friuli Venezia Giulia, 1979).

Per un'analisi quantitativa più affidabile possono essere utilizzate le *Carte topografiche IGM* (Istituto Geografico Militare) in scala 1:25000, reperibili presso l'Università IUAV di Venezia (Tabella 4.1). Allo scopo di utilizzarle per la ricostruzione dell'evoluzione nel tempo delle morfologie costiere e degli interventi antropici in laguna (come vedremo meglio più avanti) ciascuna carta è stata analizzata in maniera critica e confrontata con le altre informazioni a nostra disposizione ed è stata geo-riferita attraverso il software ESRI ArcGis for Desktop 10.3.1.

Tutte le carte topografiche storiche utilizzate per la realizzazione dello studio sono riferite al meridiano di Roma (Monte Mario) anche se è stata accertata un'irregolarità nella carta raffigurante il bacino di Buso del 1938 che presenta il reticolo chilometrico sfasato rispetto alle altre carte prese in considerazione.

Tabella 4.1. Carte topografiche IGM reperite presso l'Università IUAV di Venezia

Codice ID	Denominazione	Anno rilievo
40IISO1915 Buso	Porto Buso	1891/94
40IISO1932 Buso	Porto Buso	1894
40IISO1938 Buso	Porto Buso	1938
40IISO1949 Buso	Porto Buso	1938
40IISE1917 Grado	Grado	1891 /94
40IISE1927 Grado	Grado	1894
40IISE1938 Grado	Grado	1938
40IISE1949 Grado	Grado	1938
40IISE1891 Lignano	Lignano	1891
40IISE1906 Lignano	Lignano	1891
40IISE1910 Lignano	Lignano	1891
40IISE1917 Lignano	Lignano	1917
40IISE1927 Lignano	Lignano	1927
40IISE1932 Lignano	Lignano	1927
40IISE1938 Lignano	Lignano	1938
40IISE1951 Lignano	Lignano	1951

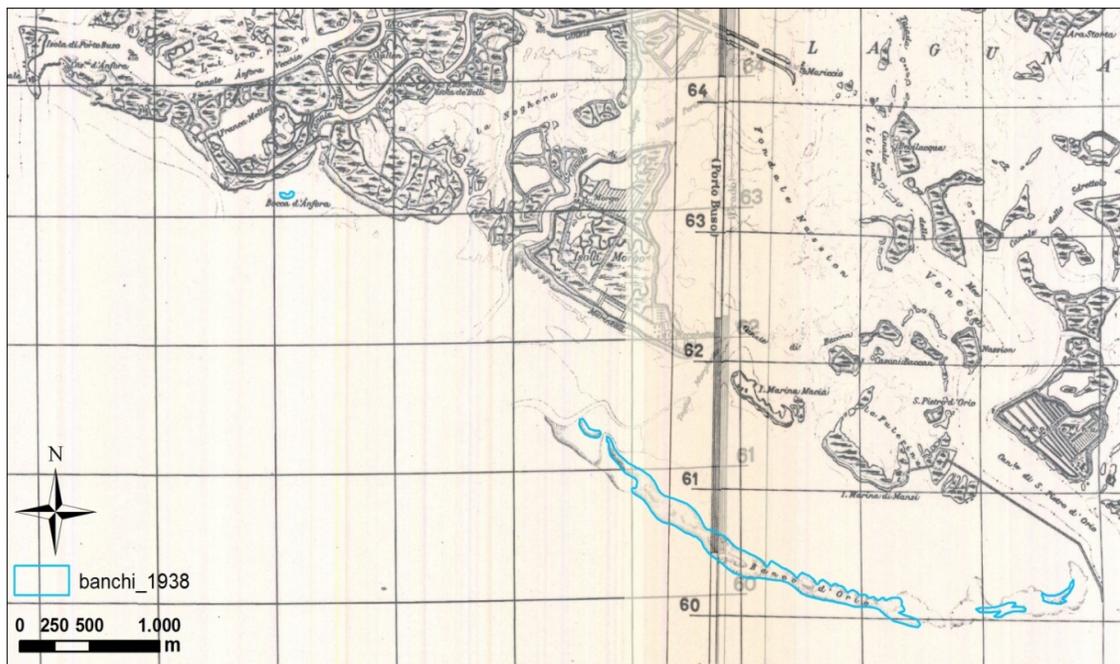
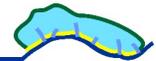


Figura 4.3. Esempio di perimetrazione dei banchi d'Anfora, d'Orio e dei Tratauri (linea azzurra) realizzata mediante l'utilizzo delle carte topografiche dell'Istituto Geografico Militare del 1938.

#### 4.2.2. Foto aeree

Sono state consultate e utilizzate i seguenti set di foto aeree che coprono l'intera superficie della laguna:

- **1954:** fotogrammi in B.N. 23x23 cm (scala nominale 1:35000) acquisiti durante il volo GAI (Gruppo Aereo Italiano) del medesimo anno. I fotogrammi, custoditi presso il Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste, sono stati scannerizzati, georiferiti e mosaicati in ambiente GIS nel corso di precedenti progetti di ricerca.
- **1978:** foto aeree prodotte dalla CGR (*Compagnia Generale Riprese-aeree*) per il CNR (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*) e sono in possesso del Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste, sono stati scannerizzati, georiferiti e mosaicati in ambiente GIS nel corso di precedenti progetti di ricerca.
- **1990** concesse in consultazione dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. I fotogrammi sono a colori, 23x23 cm e fanno parte del volo CGR, lotto 10 Trieste, utilizzati per la redazione della Carta Tecnica Regionale (scala nominale 1:10000). Anche queste sono state scannerizzate, mosaicate e georiferite in ambiente GIS nell'ambito di precedenti progetti di ricerca, sulla base della CTRN (*Carta Tecnica Regionale Numerica*) della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
- **2003:** foto aeree scattate in bassa marea gentilmente fornite, in formato digitale georiferito, dall'ARPA FVG (*Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia*);
- **2003:** orto-foto digitali prodotte dalla CGR e fornite dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
- **2007:** orto-foto digitali a tre bande (Blu, Verde e Infrarosso vicino) prodotte dalla CGR e fornite dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia..
- **2008 - 2010:** orto-foto digitali messe a disposizione dalla Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia realizzate in concomitanza al Volo Lidar, i fotogrammi che riguardano la laguna sono stati realizzati parte nel 2008 e parte nel 2010.



- **2012:** orto-foto digitali realizzate da Helica Srl su incarico della Protezione Civile FVG, consultate sul webGIS dell'Ente.
- **2014:** Orto-foto digitali realizzate da AgEA Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura fornite dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.

#### 4.2.3. Le carte batimetriche della laguna

La conformazione morfologica e batimetrica della laguna passata e presente è nota dalla *Carta Idrografica del Magistrato alle Acque di Venezia* pubblicata nel 1966 (Dorigo, 1966; Figura 4.4.) e dalla recente *Carta batimetrica della Laguna di Marano e Grado* (Triches et al., 2011; Figura 4.5). Sono inoltre disponibili descrizioni e carte storiche (Dorigo 1965; Brambati, 1969) e una carta geomorfologica per la sola laguna di Grado (Gatto & Marocco, 1992).

Le prime due cartografie citate sono entrambe disponibili in formato digitale; la prima in quanto digitalizzata grazie a una collaborazione di ricerca tra la non più esistente Autorità di Bacino Regionale del Friuli Venezia Giulia e il gruppo di ricerca del DMG coordinato dal prof. Giorgio Fontolan. La seconda è stata direttamente prodotta in formato digitale.



Figura 4.4. Elemento della *Carta Idrografica del Magistrato alle Acque di Venezia* (Dorigo, 1966), il riferimento per i rilievi è l'anno 1964, si tratta di 17 tavole in scala 1:10.000 che coprono l'intera superficie lagunare.

Rappresentano inoltre strumenti utili le seguenti cartografie:

- *Carta Tecnica Regionale Numerica*, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, anno 2003;
- *Carta Geologico Tecnica (CGT)* - Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia - Scala 1:5000 gentilmente fornita dal Servizio Geologico;
- *Dinamica evolutiva delle barene* - Accordo di collaborazione con ARPA FVG per un progetto di ricerca e studio sedimentologico - geochimico delle aree barenicole della laguna di Marano e Grado d.d. 20 aprile 2012 – (Fontolan et al., 2013).

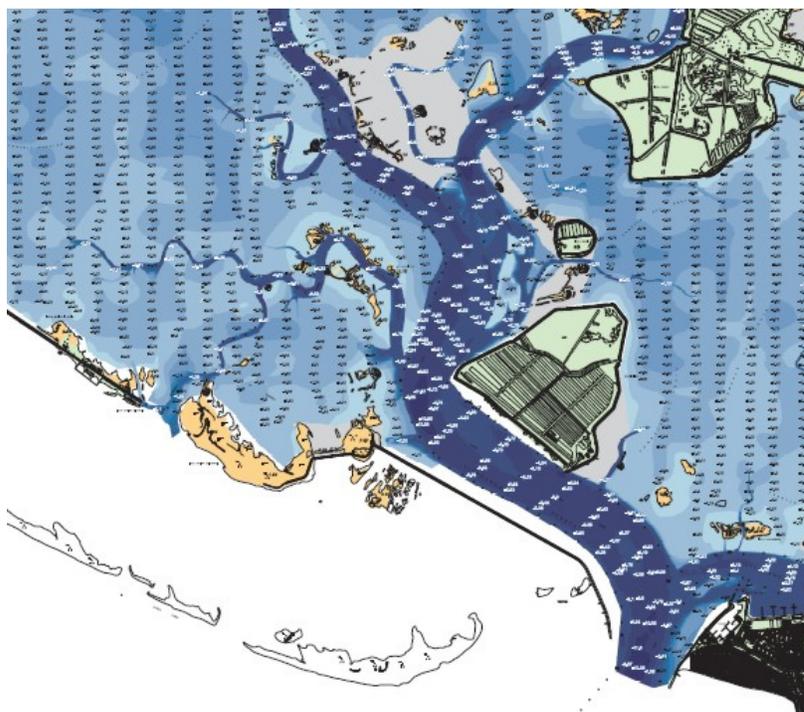
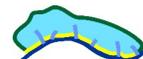


Figura 4.5. Estratto della Carta batimetrica della Laguna di Marano e Grado (Triches et al., 2011)

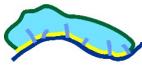
#### 4.2.4. Rilievi topo-batimetrici dei litorali

Con riferimento alla porzione costiera della laguna sono disponibili diverse levate topo-batimetriche realizzate lungo sezioni perpendicolari alla costa.

Le isole barriera di Martignano e Sant'Andrea sono state interessate da una levata topo-batimetrica realizzata nel 1968 (rilievo CNR - Gruppo di Studio dei Litorali) che comprende due soli profili corrispondenti all'isola di Martignano (profilo 45 e 46) e sei all'isola di Sant'Andrea (dal 39 al 44). Per l'isola di Martignano inoltre sono stati realizzati 6 profili nel 1985 (Brambati, 1987), 10 profili nel 1999 (Segala, 1999) e 7 profili nel 2003 (Burla, 2003). Per l'isola di Sant'Andrea 4 profili nel 1985 (Brambati, 1987) e 6 profili nel 2003 (Burla, 2003).

Per quel che riguarda i banchi sono disponibili tre levate topo-batimetriche realizzate rispettivamente nel 1968 (rilievo CNR - Gruppo di Studio dei Litorali), 2007 (nell'ambito del Progetto Nazionale VECTOR) e 2015 (Ulliani, 2015) realizzata ad hoc per questo studio (si veda il paragrafo 4.6.1 per i dettagli). Si tratta, per ogni annata, di 11 profili spazati tra loro di circa 800 m. I profili del 2015 sono stati appositamente realizzati lungo le medesime sezioni del passato con lo scopo di individuare e valutare le modificazioni morfologiche che hanno interessato sia la spiaggia emersa che quella sottomarina fino alla profondità di chiusura, profondità alla quale il fondale non è più influenzato dal moto ondoso incidente sulla costa.

Sono infine disponibili alcuni rilievi topografici della linea di riva dei banchi: 2002 (Burla, 2003), 2007 (nell'ambito del Progetto Nazionale VECTOR), 2008 e 2015 è stato fatto anche un rilievo topografico della linea di riva.



#### 4.2.5. I sedimenti

Le carte sedimentologiche rappresentano uno degli aspetti conoscitivi di base per lo studio e la gestione delle lagune. Nell'ambito dello Studio, nonostante l'attività non fosse prevista inizialmente dal piano di lavoro, si è deciso di provvedere alla costruzione di una mappa sedimentologica della laguna sulla base dei dati forniti dagli Enti relativamente ai campionamenti eseguiti in laguna in tempi più recenti possibile. Il lavoro è stato svolto anche nell'ambito della tesi di laurea triennale di Alex Paganin (Paganin, 2016).

##### *Dati e metodologia di lavoro*

Per arrivare alla creazione della carta sedimentologica sono stati presi in considerazione e valutati numerosi dati riguardanti più campagne di campionamento effettuate nell'ambito di vari progetti finalizzati alla caratterizzazione dei sedimenti, in particolare sono stati forniti da ARPA FVG:

- dati relativi a una campagna svolta tra il 2008 e il 2009 per il "Piano di Caratterizzazione Ambientale di Aree e Canali interni alla Laguna di Marano Lagunare e Grado. Sito di bonifica di interesse nazionale di Marano Lagunare e Grado" redatto nel 2008; riguardano 154 punti di prelievo (carote) ubicati sulle piane (fondali) del bacino di Buso tra canale Taglio e piane a nord della Gran Chiusa (sigle campioni da GM02/117 a GM02/271 indicati sotto la voce "Piano di Caratterizzazione 2008 ICRAM piane") dei quali sono stati forniti solo i dati relativi a % sabbia, % silt, % argilla e peso specifico. In un momento successivo erano stati realizzati 169 campionamenti sulle piane per i quali non sono state realizzate le analisi granulometriche. Entrambe queste serie di stazioni di campionamento sono indicate in Figura 4.6.

- dati relativi alla medesima campagna di cui sopra ma relativi ai canali importanti per la navigazione in laguna (riferiti al PdC 2008 167 campioni da GM03/0362 a GM03/0525); di questi campioni sono disponibili solo i dati relativi a % sabbia, % silt, % argilla e peso specifico.

- dati relativi a una fase ancora successiva del Piano di Caratterizzazione riguardanti 41 stazioni sui fondali coincidenti con parte delle precedenti, analizzate col metodo TRIADE, costituito da una caratterizzazione integrata di chimica, tossicologia e comunità bentoniche dei sedimenti lagunari e dall'analisi del bioaccumulo e dei biomarker negli organismi. Le analisi risalgono al 2011. I campioni sono stati raccolti mediante bennate e le analisi granulometriche realizzate con due differenti metodologie: il metodo dei setacci per la frazione sabbiosa ( $> 63\mu\text{m}$ ) e il granulometro laser per la frazione fine.

- dati relativi a 102 stazioni di campionamento ARPA (indicati con sigla "staz\_" seguita da un numero progressivo da 1 a 102) sui fondali lagunari. Le analisi granulometriche sono state compiute presso il laboratorio del Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università di Trieste con il granulometro laser. Sono disponibili i dati completi relativi alle diverse classi dimensionali, le percentuali di sabbia, silt e argilla e i parametri statistici.

- dati relativi a diverse campagne di campionamento per un totale di 50 stazioni, solo in parte coincidenti con le precedenti monitorate in diversi momenti per un periodo che va dal 2013 fino al 2016, analisi eseguite da SELC.

I criteri di scelta dei dati per la costruzione della carta sedimentologica sono stati:

- la metodologia di campionamento uguale per tutti i campioni al fine di garantirne la stessa rappresentatività

- il metodo di analisi uguale per tutti i campioni per garantire la confrontabilità dei dati

- i campionamenti eseguiti in un lasso di tempo ragionevolmente ridotto

- la presenza dei parametri sedimentologici (MZ= diametro medio, SD= deviazione standard) per ogni campione preso in considerazione

- la distribuzione abbastanza uniforme su tutta la laguna.

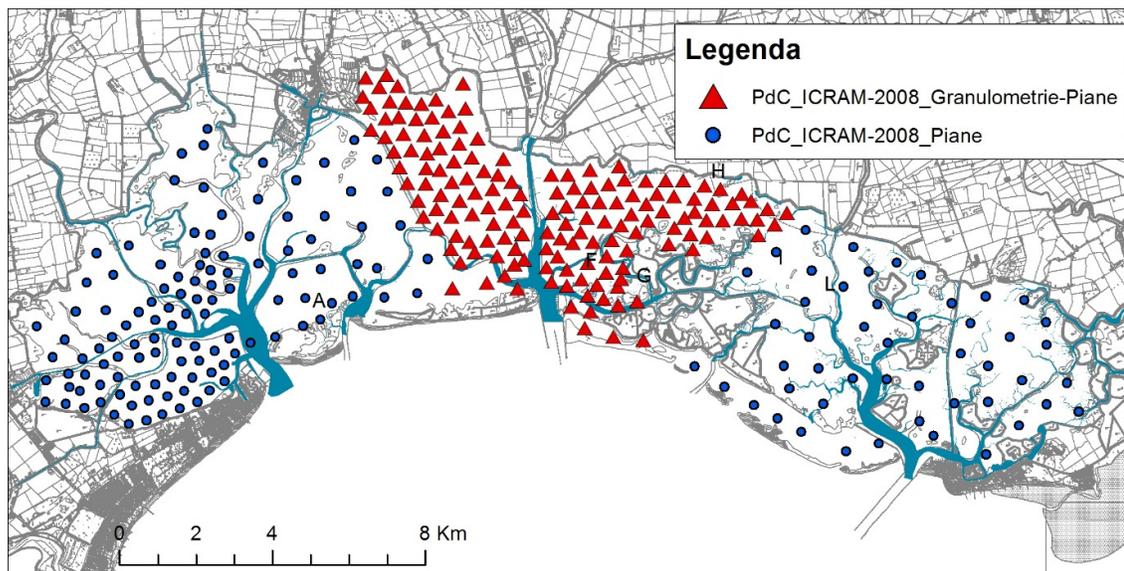
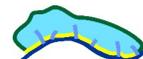
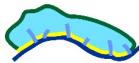


Figura 4.6. Stazioni di campionamento per il Piano di caratterizzazione ICRAM 2008.



Figura 4.7. Distribuzione dei punti di campionamento ARPA 2008-2009 scelti per la creazione della carta

Tra tutti quelli messi a disposizione solo i dati forniti da ARPA relativi al campionamento effettuato tra il 2008 e il 2009 rispettavano i criteri appena definiti. I dati sedimentologici scelti ed elaborati in questa sede sono quindi relativi a campionamenti effettuati tra il maggio 2008 e il settembre 2009 da ARPA FVG. I campioni sono stati raccolti su 87 stazioni distribuite su tutto il bacino lagunare per poi essere analizzati attraverso il Granulometro laser Malvern Mastersizer 2000 dal laboratorio del dipartimento di Matematica

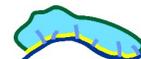


e Geoscienze (allora Dipartimento di Geoscienze) dell'Università degli Studi di Trieste. I dati risultanti sono riportati in Tabella 4.2.

La costruzione delle mappe è avvenuta utilizzando il software Esri ARCGIS e una serie di test ha mostrato che la metodologia di interpolazione migliore in questo caso è il *Kernel smoothing*, che minimizza l'errore tra il valore reale e quello predetto. La funzione *Kernel smoothing* che si è deciso di utilizzare ha inoltre un secondo vantaggio oltre all'interpolazione locale, cioè la possibilità di inserire delle barriere assolute tra i punti. In questo modo si impedisce al sistema di creare un'interpolazione tra punti vicini che però non hanno relazioni tra loro, e questo si è rivelato un elemento essenziale per il lavoro sulla laguna in quanto alcuni elementi presenti nel bacino rappresentano effettivamente delle barriere naturali per la distribuzione del sedimento.

Tabella 4.2. Dati utilizzati per la costruzione della carta sedimentologica (MZ = diametro medio espresso in unità phi, SD = deviazione standard in unità phi, Sk = simmetria, Kg = appuntamento) (Folk & Ward, 1957).

SIGLA	DATA	COORD X	COORD Y	SAND (%)	SILT (%)	CLAY (%)	MZ (phi)	SD (phi)	Sk	Kg
staz_1	marzo-09	2373261	5061668	14.6	81.3	4.05	5.81	1.71	0.02	0.90
staz_3	marzo-09	2375527	5063081	97.1	2.9	0.00	2.00	0.61	0.06	0.99
staz_8	marzo-09	2370082	5063856	28.4	66.2	5.36	5.38	2.24	0.07	1.00
staz_9	marzo-09	2371806	5065692	9.5	84.0	6.47	6.23	1.76	0.00	1.00
staz_12	marzo-09	2372683	5063820	14.2	80.1	5.69	5.98	1.86	0.00	0.95
staz_14	marzo-09	2375321	5064166	52.8	43.4	3.72	4.49	2.07	0.41	1.01
staz_16	marzo-09	2373005	5065576	27.9	66.5	5.60	5.50	2.01	0.20	0.82
staz_18	marzo-09	2374599	5066843	36.8	57.7	5.46	5.13	2.20	0.26	0.87
staz_24	marzo-09	2375962	5066466	22.7	72.4	4.93	5.52	1.92	0.18	0.88
staz_27	marzo-09	2377797	5068678	62.4	35.1	2.53	4.13	1.95	0.51	0.94
staz_28	marzo-09	2376923	5065945	24.5	70.0	5.46	5.52	2.11	0.06	0.96
staz_32	marzo-09	2378887	5066338	45.3	49.7	4.97	4.77	2.18	0.38	0.89
staz_33	marzo-09	2380097	5066394	39.4	57.3	3.34	4.66	2.28	0.06	0.98
staz_36	marzo-09	2377973	5064230	32.1	62.3	5.64	5.32	2.23	0.12	0.89
staz_37	marzo-09	2377549	5064999	35.2	59.9	4.91	5.08	2.35	0.06	0.97
staz_39	marzo-09	2382011	5064689	29.7	65.6	4.76	5.23	2.27	-0.02	0.99
staz_42	marzo-09	2379488	5070184	47.8	48.7	3.54	4.61	2.09	0.34	0.89
staz_48	marzo-09	2382830	5067083	42.8	52.3	4.90	4.84	2.34	0.22	0.86
staz_49	marzo-09	2382910	5065961	34.4	60.6	4.96	5.13	2.15	0.24	0.95
staz_50	marzo-09	2381435	5067516	39.3	55.7	5.00	4.99	2.20	0.29	0.90
staz_51	marzo-09	2381596	5067516	24.1	71.2	4.69	5.63	2.04	-0.06	0.89
staz_54	marzo-09	2379712	5068742	35.0	60.3	4.66	5.08	2.12	0.20	0.91
staz_55	marzo-09	2383961	5064990	100.0	0.0	0.00	1.89	0.55	0.01	0.95
staz_57	marzo-09	2384008	5067476	58.9	36.9	4.20	4.34	2.02	0.48	1.29
staz_58	marzo-09	2385356	5066336	13.7	80.6	5.66	6.05	1.89	-0.06	1.01
staz_61	marzo-09	2385946	5066995	17.0	77.9	5.08	5.94	1.97	-0.12	1.02
staz_63	marzo-09	2387037	5067420	34.1	62.0	3.88	5.11	2.31	-0.02	0.88
staz_64	marzo-09	2387390	5065740	25.0	66.8	8.20	5.71	2.56	-0.15	1.00
staz_67	marzo-09	2388977	5065071	27.4	66.7	5.89	5.57	2.38	-0.11	0.93
staz_68	marzo-09	2390803	5064150	17.8	76.2	5.96	5.85	1.99	-0.01	1.00
staz_69	marzo-09	2390295	5066136	27.3	66.2	6.44	5.54	2.36	-0.03	0.96
staz_72	marzo-09	2389786	5063877	29.7	63.2	7.08	5.46	2.63	-0.16	0.89
staz_75	marzo-09	2388391	5062074	79.1	18.9	1.93	3.19	1.79	0.56	1.82
staz_77	marzo-09	2390892	5062956	45.7	48.6	5.73	4.81	2.43	0.32	0.86
staz_79	marzo-09	2392382	5060319	100.0	0.0	0.00	2.16	0.59	0.00	0.94
staz_81	marzo-09	2391180	5061553	40.2	55.8	3.95	4.57	2.65	-0.04	0.93
staz_83	marzo-09	2391396	5065015	16.3	77.6	6.10	5.93	1.96	-0.03	1.02
staz_85	marzo-09	2392647	5063669	19.1	73.9	6.94	5.89	2.19	-0.10	1.07
staz_87	marzo-09	2393817	5063821	18.3	74.0	7.76	6.01	2.23	-0.11	1.08
staz_88	marzo-09	2393849	5061890	25.6	69.6	4.77	5.39	1.97	0.13	0.95
staz_90	marzo-09	2392575	5062010	46.1	50.1	3.81	4.64	2.21	0.28	1.01
staz_93	marzo-09	2394521	5060750	12.9	80.5	6.60	6.07	1.88	0.01	0.97
staz_94	marzo-09	2395726	5063438	32.8	61.9	5.23	5.14	2.38	-0.02	0.95
staz_95	marzo-09	2395456	5062194	24.2	70.3	5.51	5.64	2.11	-0.02	0.90
staz_96	marzo-09	2395291	5060199	35.3	60.4	4.31	5.15	2.31	0.01	0.85
staz_98	marzo-09	2397198	5061919	27.1	67.2	5.74	5.45	2.27	0.00	0.97
staz_5	maggio-09	2372741	5062867	19.0	74.7	6.3	5.92	2.05	-0.10	0.97
staz_13	maggio-09	2370981	5063262	15.0	70.8	14.2	6.52	2.48	-0.11	1.11
staz_17	maggio-09	2374339	5068882	16.7	77.3	6.0	5.80	1.92	0.11	0.94



staz_20	maggio-09	2374528	5065210	29.6	64.7	5.7	5.52	2.08	0.14	0.80
staz_31	maggio-09	2377765	5066498	33.4	61.3	5.3	5.00	2.60	-0.09	0.93
staz_43	maggio-09	2378967	5069343	15.6	78.8	5.6	5.93	1.94	-0.05	1.05
staz_44	maggio-09	2381346	5069935	9.0	85.5	5.6	6.18	1.68	0.02	1.10
staz_45	maggio-09	2382474	5067995	24.1	70.0	5.8	5.66	2.16	0.02	0.93
staz_52	maggio-09	2381588	5065857	25.4	68.8	5.8	5.52	2.30	-0.07	1.02
staz_53	maggio-09	2380450	5067756	54.6	41.3	4.0	3.86	2.85	0.16	0.75
staz_59	maggio-09	2384283	5065812	28.2	65.9	5.9	5.47	2.41	-0.05	0.95
staz_60	maggio-09	2385490	5067812	15.9	78.2	5.9	5.96	2.00	-0.10	1.13
staz_65	maggio-09	2387189	5066474	17.2	77.0	5.8	5.94	2.05	-0.13	1.09
staz_71	maggio-09	2390500	5065087	47.6	47.9	4.5	4.38	2.72	0.13	0.77
staz_76	maggio-09	2386343	5063593	8.1	84.2	7.7	6.60	1.73	-0.05	1.30
staz_78	maggio-09	2390160	5062876	37.3	57.6	5.1	4.81	2.61	0.02	0.92
staz_84	maggio-09	2391909	5063589	27.0	65.3	7.7	5.61	2.52	-0.08	0.98
staz_86	maggio-09	2393544	5065080	7.1	86.6	6.3	6.49	1.64	-0.04	1.16
staz_97	maggio-09	2395947	5061009	30.1	63.7	6.2	5.40	2.34	0.05	0.91
staz_99	maggio-09	2396694	5062894	14.4	77.1	8.5	6.18	2.08	-0.04	1.06
staz_22	settembre-09	2373838	5067436	39.9	55.6	4.5	4.70	2.21	0.22	1.23
staz_34	settembre-09	2379191	5067941	13.0	78.8	8.2	6.14	2.04	0.01	1.09
staz_2	maggio-08	2374804	5062393	45.4	50.1	4.5	4.61	2.05	0.35	1.00
staz_6	maggio-08	2371098	5062019	28.8	67.3	3.9	4.94	1.72	0.26	1.29
staz_10	maggio-08	2372252	5064949	26.0	70.2	3.8	5.02	1.66	0.24	1.21
staz_23	maggio-08	2376170	5067876	29.5	66.7	3.8	4.90	1.79	0.19	1.33
staz_25	maggio-08	2376041	5065243	27.9	67.5	4.6	5.07	1.81	0.29	1.19
staz_26	maggio-08	2377375	5067376	22.2	73.2	4.6	5.22	1.71	0.30	1.14
staz_29	maggio-08	2379183	5065160	70.3	27.8	1.9	3.73	1.55	0.41	1.64
staz_35	maggio-08	2376191	5064480	41.8	55.0	3.2	4.40	2.20	0.07	1.24
staz_38	maggio-08	2380218	5064626	45.4	51.9	2.7	4.30	2.13	0.09	1.34
staz_46	maggio-08	2382914	5065080	77.7	20.5	1.7	3.37	1.52	0.45	1.71
staz_56	maggio-08	2385826	5064659	28.3	66.2	5.5	5.21	1.92	0.33	1.05
staz_62	maggio-08	2388704	5067117	33.5	62.2	4.2	4.91	2.06	0.15	1.21
staz_73	maggio-08	2384991	5063953	35.7	59.9	4.4	4.91	2.05	0.25	1.16
staz_80	maggio-08	2390573	5060736	26.5	68.3	5.2	5.24	1.99	0.20	1.13
staz_82	maggio-08	2391613	5065673	17.4	77.9	4.7	5.37	1.66	0.26	1.15
staz_89	maggio-08	2394115	5060680	46.8	49.9	3.2	4.47	1.64	0.43	1.25
staz_91	maggio-08	2395083	5064382	44.4	51.0	4.6	4.47	2.44	0.14	0.92
staz_92	maggio-08	2394427	5062895	30.0	65.1	5.0	5.01	2.05	0.19	1.29
staz_100	maggio-08	2399795	5062872	27.9	66.6	5.5	5.22	1.96	0.25	1.06

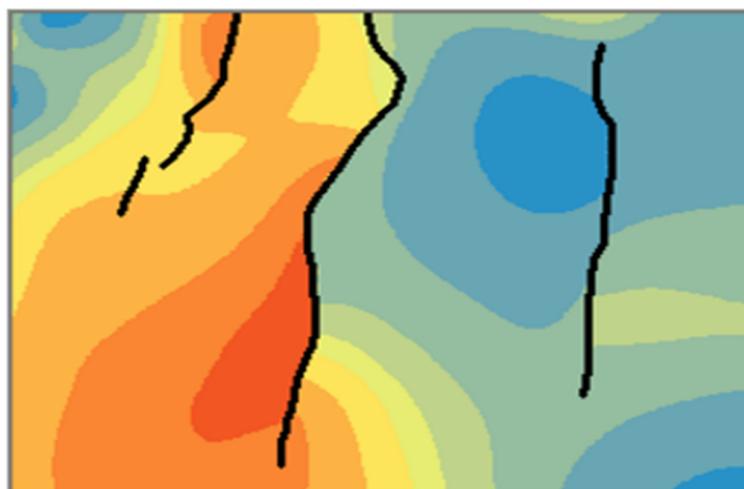
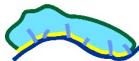


Figura 4.8. Esempio di barriera assoluta (ESRI - ArcGIS, 16/01/2017)

È stato quindi creato un file shape “disegnando” all’interno tutte queste barriere ideali che si trovano nel bacino lagunare. Queste sono state posizionate prima di tutto in corrispondenza delle isole maggiori e delle valli da pesca più importanti in quanto entrambe queste morfologie sono vere e proprie barriere fisiche per la diffusione delle correnti e del sedimento in laguna, e inoltre in corrispondenza di tutte quelle zone caratterizzate da rientranze o sporgenze del margine lagunare. In questo modo i punti presenti nelle



zone più interne non vengono interpolati con altri presenti in una zona vicina con cui però non hanno in realtà alcuna relazione. Infine si è considerata come barriera naturale anche il terrapieno su cui è situata la strada che collega Belvedere a Grado, in quanto funge da barriera che ostacola lo scambio idrico tra la parte più orientale della laguna e il resto.

Nel scegliere il metodo di interpolazione, inoltre, la larghezza di banda (bandwidth) utilizzata è stata diminuita portandola fino al minimo possibile in modo da interpolare solo i punti più vicini nell'intorno del singolo dato; questo ci ha permesso di creare una caratterizzazione del bacino lagunare più localizzata e meno influenzata dagli andamenti geografici generali.

Analizzando la distribuzione dei punti di campionamento in Figura 4.7 si nota la mancanza di dati nelle immediate vicinanze delle bocche di Sant'Andrea e Grado, che come è noto dalla letteratura sono tipicamente caratterizzate da sedimenti prevalentemente sabbiosi. La mancanza di questi dati ha come conseguenza che l'interpolazione si basa sul peso di punti ubicati più all'interno rispetto alla bocca stessa, facendo sì che la bocca risulti meno sabbiosa di quello che è in realtà. Per porre rimedio a questo errore grossolano è stato inserito un punto fittizio per ciascuna bocca, attribuendo un valore di MZ e di SD pari alla media dei valori delle altre bocche: 1,93 phi per Mz e 0,57 per la SD. A supporto di questa scelta è opportuno precisare che i dati forniti da ARPA che ha effettuato nel 2009 una campagna di campionamento in questi canali mostrano effettivamente una percentuale del 100% di sabbia per la bocca di Grado, del 95,25% di sabbia per la bocca di Sant'Andrea (4,01% di silt e 0,74% di argilla); come già detto i valori dei parametri statistici non sono però stati forniti, di qui la necessità di attribuire un valore fittizio.

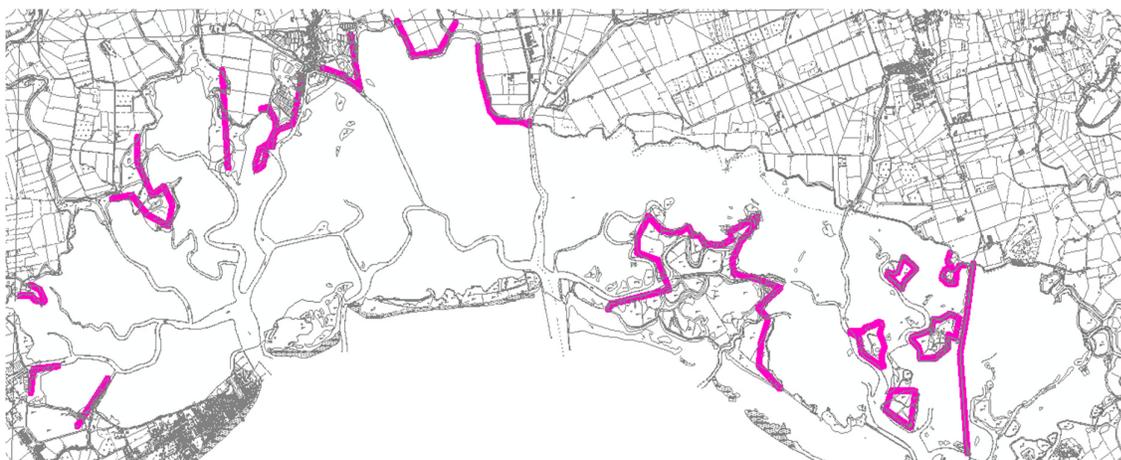


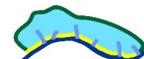
Figura 4.9. Linee barriera disegnate in laguna per essere considerate per l'interpolazione kernel smoothing

#### La distribuzione dei sedimenti in laguna

A partire dai dati forniti da ARPA e secondo la metodologia appena descritta sono state costruite le seguenti mappe:

- carta della distribuzione del parametro MZ = diametro medio espresso in unità phi (Figura 4.10)
- carta della distribuzione percentuale di sabbia (Figura 4.11)
- carta della distribuzione percentuale di silt (Figura 4.12)
- carta della distribuzione percentuale di argilla (Figura 4.13).

Come si può notare dalle figure l'area elaborata non comprende ovviamente le delle valli da pesca e la zona compresa tra i banchi esterni e l'antico cordone litorale tra Porto Buso e Grado in quanto considerata troppo periferica e poco rappresentata in termini di campioni rispetto al complesso lagunare; cinque dei punti forniti da ARPA ricadono all'interno di queste zone e di conseguenza sono stati eliminati e non considerati.



Le mappe ottenute evidenziano come in laguna sia preponderante un gradiente legato all'idrodinamica lagunare caratterizzata dal flusso e riflusso della marea. Esso fa sì che presso le bocche siano presenti sedimenti più grossolani come la sabbia (MZ compreso tra 2 e 4 phi) mentre addentrandosi in laguna si sedimentano materiali sempre più fini (MZ fino a 6.5 phi), in corrispondenza di una diminuzione dell'energia.

Allo stesso tempo sono state evidenziate delle anomalie rispetto a questo gradiente generale indicate in Figura 4.14.

Esse sono costituite dalla zona di Marano (a), dai fondali compresi tra Sant'Andrea e Buso (b) e dal fondale delle Oche (c), che presentano sedimenti più grossolani di quanto ci si aspettasse in base al gradiente tipico. La parte più a est di Grado (d), invece, presenta un'anomalia in senso opposto con preponderante presenza di sedimento fine.

Queste zone rappresentano situazioni particolari ascrivibili a differenti cause: le modificazioni antropiche che hanno modificato l'idrodinamica di alcune aree, l'erosione protratta nel tempo con significativi approfondimenti dei fondali oppure la presenza di sabbie relitte imputabili alla sedimentazione alluvionale precedente alla formazione della laguna.

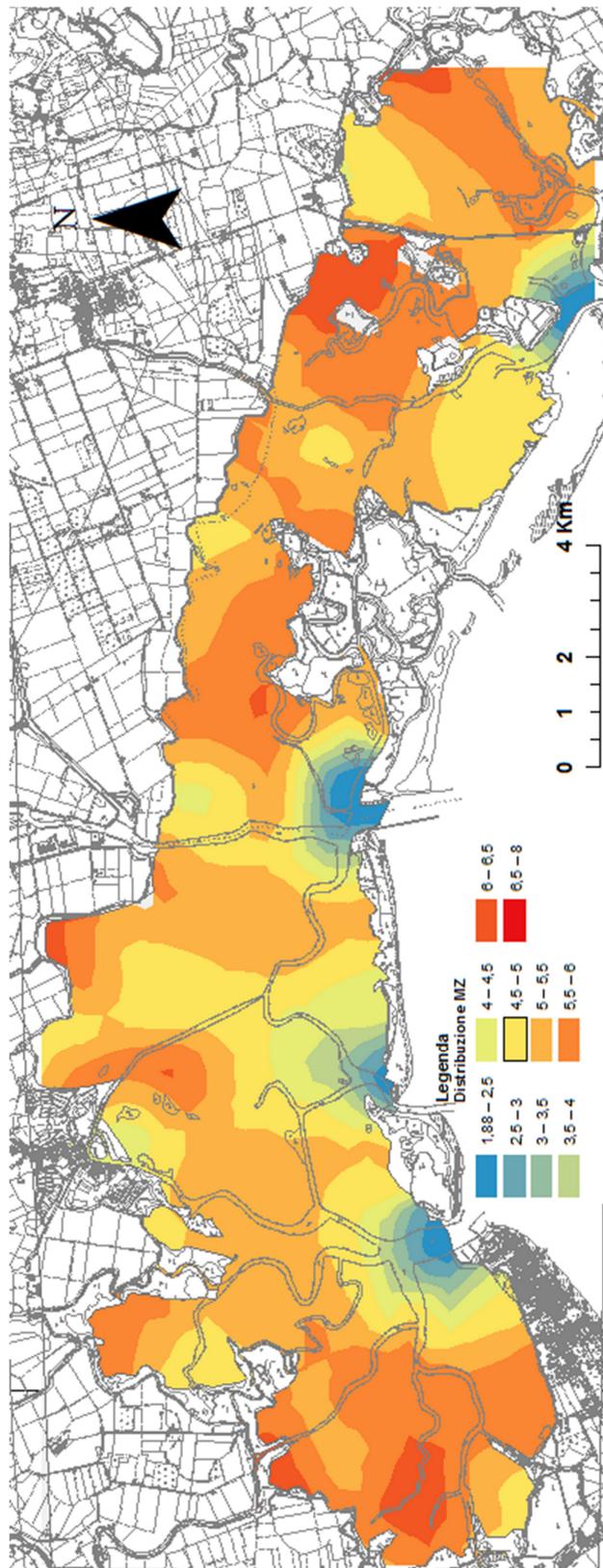


Figura 4.10. Carta della distribuzione del parametro diametro medio (Mz) espresso in unità phi.

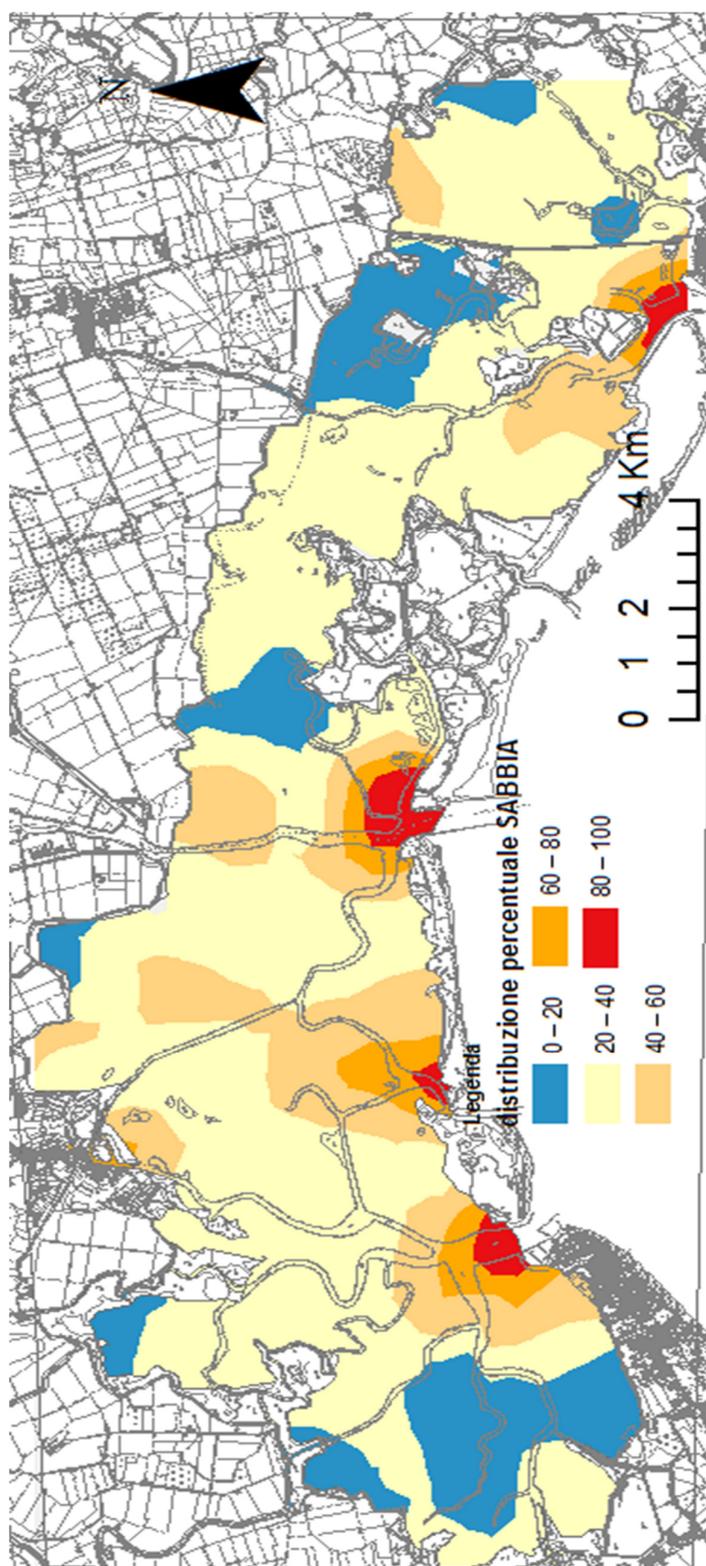


Figura 4.11. Carta della distribuzione della percentuale di sabbia.

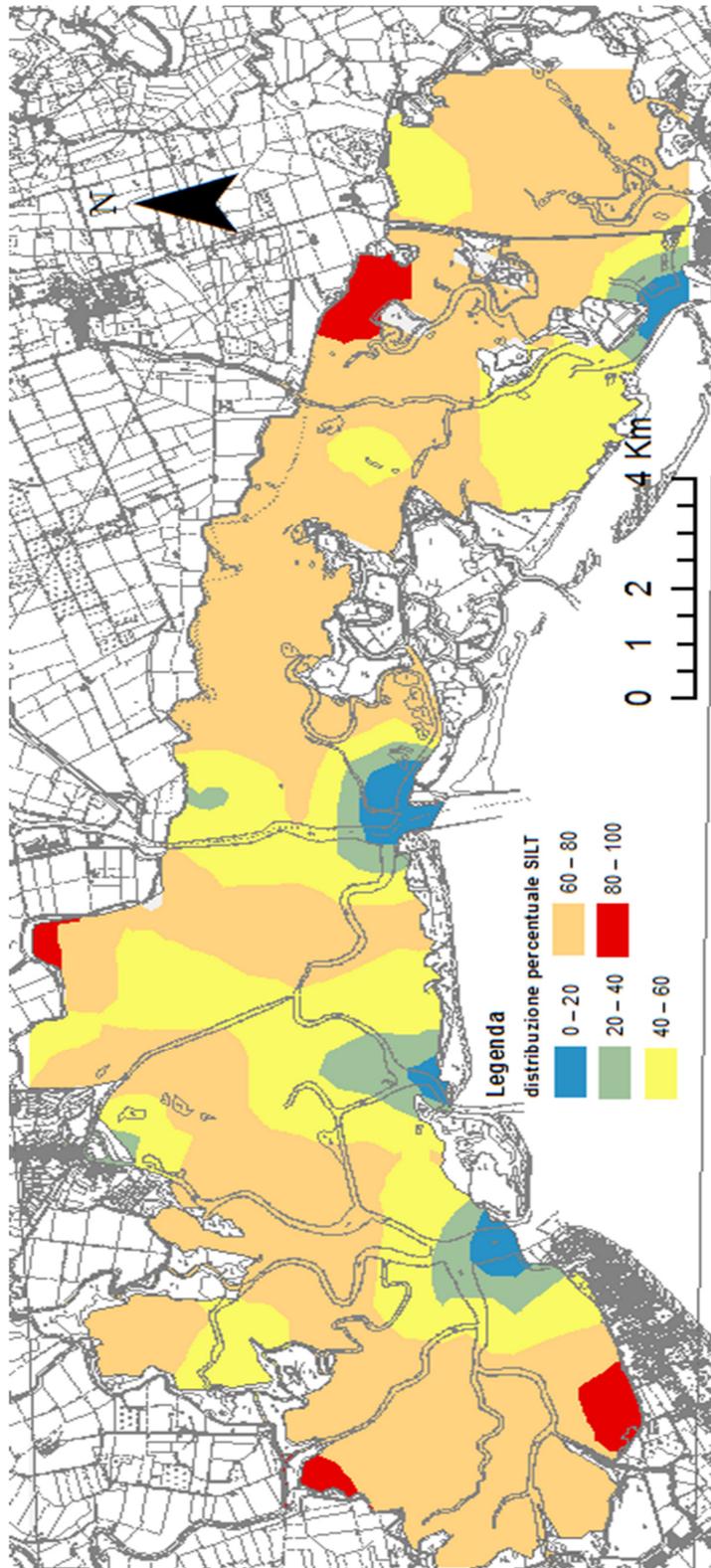


Figura 4.12. Carta della distribuzione della percentuale di silt.

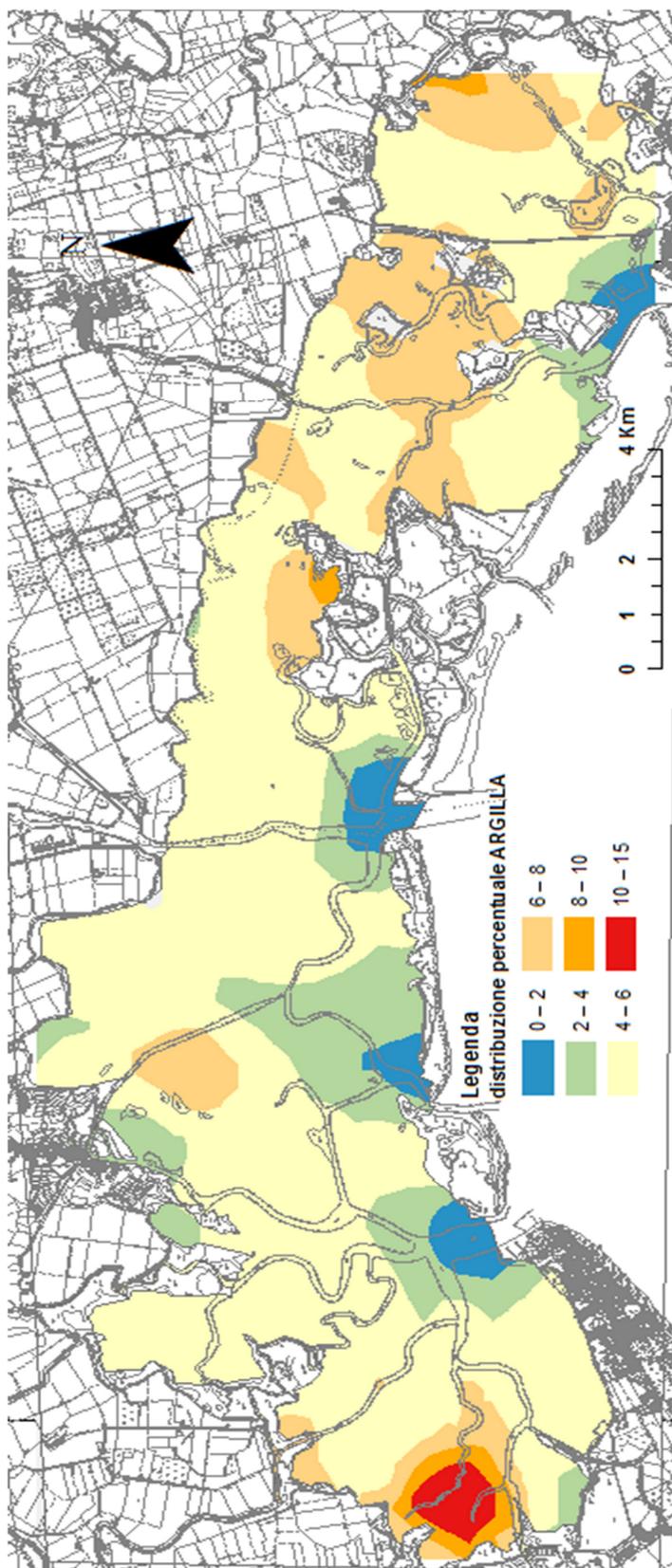
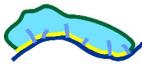


Figura 4.13. Carta della distribuzione della percentuale di argilla.



Per le carte di distribuzione percentuale di sabbia e silt si è deciso di utilizzare la scala già impiegata da Brambati (1969) per mettere ben in evidenza le zone con le maggiori percentuali; invece per la carta di distribuzione dell'argilla la scala di Brambati risultava troppo ampia e per questo si è deciso di utilizzare una scala che esprimesse un valore massimo del 15%. Per quanto riguarda la carta di distribuzione del silt si può notare come questa sia praticamente complementare alla carta di distribuzione percentuale della sabbia. La carta riguardante la percentuale di argilla al contrario presenta una distribuzione molto più eterogenea.

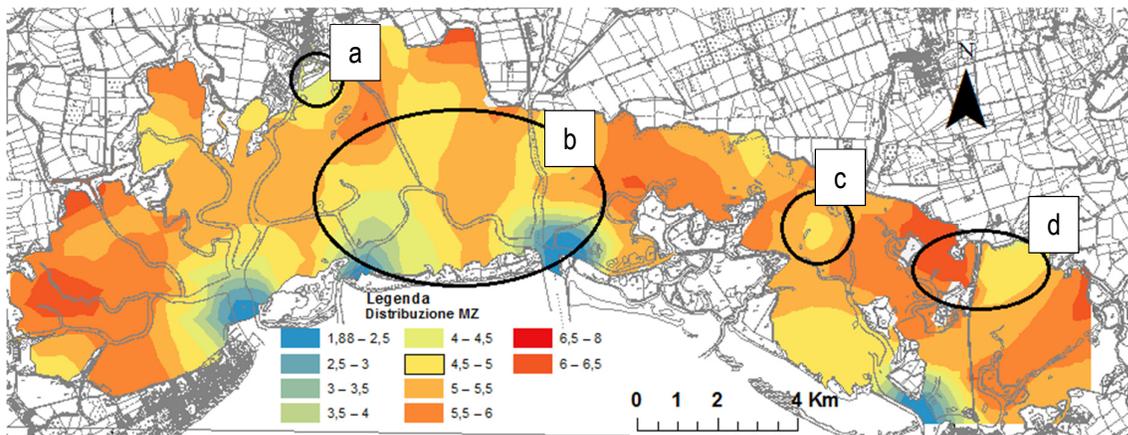


Figura 4.14. Aree con distribuzione granulometrica che può essere considerata "anomala".

La disponibilità di una carta sedimentologica della laguna in ambiente GIS, aggiornata e quanto più possibile completa, rappresenta uno strumento fondamentale per la programmazione degli interventi tesi alla tutela e al ripristino morfologico e alla garanzia delle attività antropiche che in essa si svolgono, primi fra tutti i dragaggi e la ricostruzione di barene.

La metodologia testata in questa parte dello Studio potrà essere riutilizzata nel caso, auspicabile, di un nuovo campionamento a scala lagunare.

#### 4.2.6. Il contesto evolutivo: innalzamento del livello del mare

Il contesto evolutivo della laguna e il suo destino futuro sono strettamente legati al processo di innalzamento del livello marino in atto a livello globale. Per i presenti scopi la quantificazione del processo deve essere fatta a livello locale (innalzamento relativo del livello del mare) in quanto la sua entità è il risultato della combinazione di diversi fenomeni che agiscono in maniera diversa a livello globale, regionale e locale: la subsidenza, la tettonica, l'isostasia e l'eustatismo.

La serie storica della stazione mareografica di Trieste rappresenta molto bene l'andamento della variazione relativa del livello del mare a scala locale nell'ultimo secolo: i dati, relativi al periodo 1891-2014, mostrano un trend secolare nettamente positivo in riferimento alle variazioni annuali del livello medio marino (Figura 4.15), pari a 1.36 mm/anno. Con riferimento alla stessa serie temporale, si nota che il trend di innalzamento del livello medio del mare ha subito un forte incremento durante l'ultimo ventennio, con valori 4-5 volte superiori rispetto ai decenni precedenti.

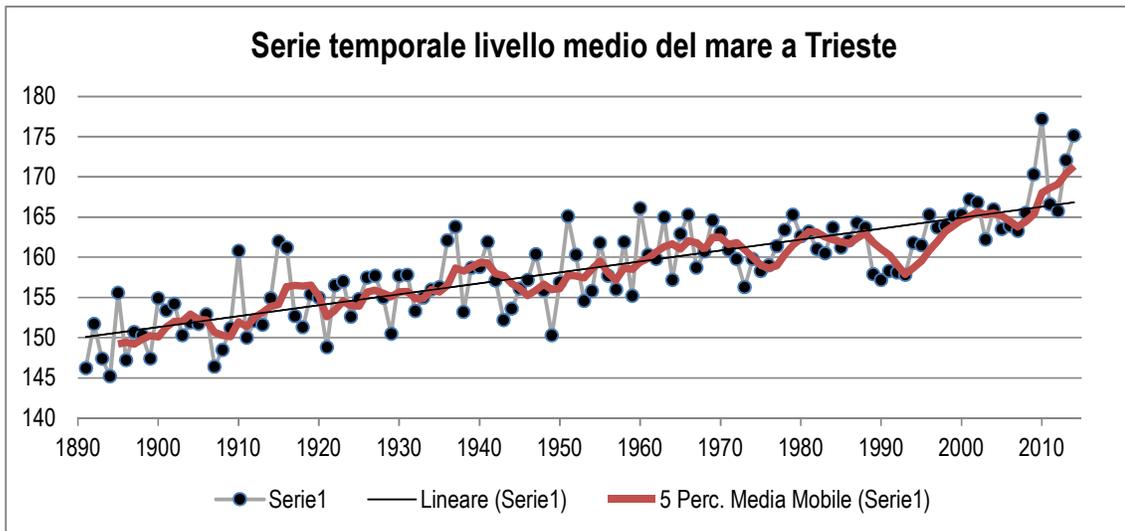
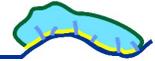


Figura 4.15. Variazioni annuali del livello medio marino in riferimento alla Stazione Mareografica di Trieste Molo Sartorio, dati in cm riferiti allo zero locale del mareografo.

I dati relativi al mareografo di Grado elaborati nell'ambito dell'attività esposta al paragrafo 3.2.1 confermano l'andamento del dato di Trieste (Figura 4.16). Va notato come nell'ultimo decennio vi siano oscillazioni piuttosto rilevanti, anche se comunque paragonabili in entità a quelle storiche.

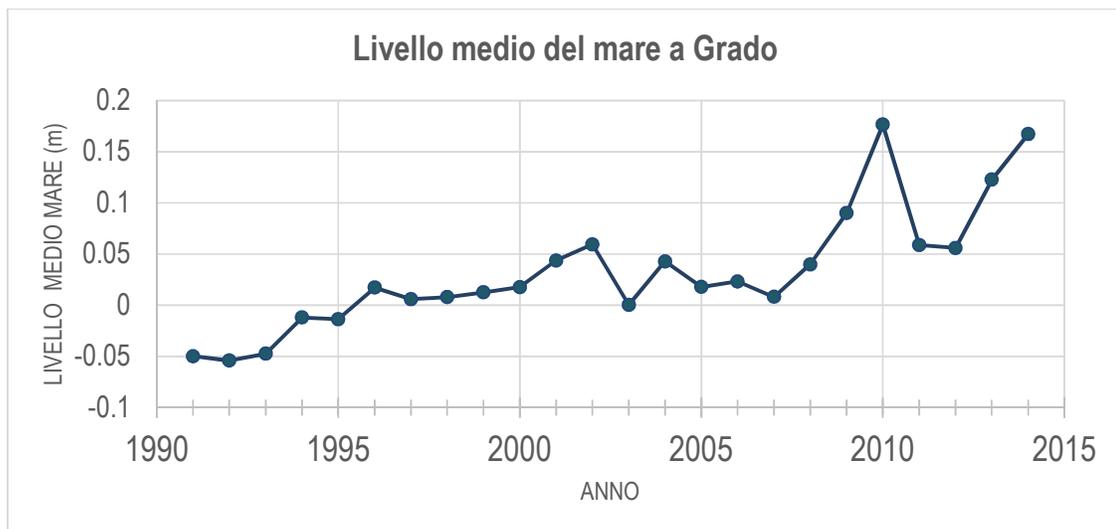
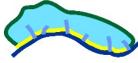


Figura 4.16. Variazioni annuali del livello medio marino in riferimento alla Stazione di Grado, dati in m riferiti allo zero IGM 42 elaborati nell'ambito dell'attività esposta al paragrafo 3.2.1.



### 4.3. Analisi geomorfologica quantitativa della laguna e analisi evolutiva (erosione/accumulo) su base cartografica

#### 4.3.1. Metodologia di analisi

Secondo una metodologia di analisi già utilizzata dal Coastal Group (UniTS) per la laguna di Venezia (Sarretta et al., 2010) l'analisi prevede un'elaborazione in GIS con lo scopo di mettere a confronto le due batimetrie della laguna realizzate in tempi diversi.

Essa prevede per ciascuna levata batimetrica la creazione dei rispettivi modelli batimetrici tridimensionali utilizzando una maglia di triangolazione irregolare (Triangulated Irregular Network, TIN).

Per la *Carta Idrografica del Magistrato alle Acque di Venezia* pubblicata nel 1966 (Dorigo, 1966) erano disponibili le batimetrie digitalizzate dall'Autorità di Bacino Regionale del Friuli Venezia Giulia (Figura 4.17). Il dataset comprende i punti batimetrici dei canali e dei fondali, i punti quotati delle isole, la linea di costa, le aree emerse e gli argini. A partire da questi elementi si è proceduto alla costruzione di un TIN inserendo alcuni ulteriori elementi lineari come i bordi canale e gli assi canale. I canali sono infatti riportati sulla carta come punti batimetrici distribuiti per sezioni trasversali, pertanto per mantenere la necessaria continuità morfologica nel modello tridimensionale è necessario creare gli assi, ovvero delle linee 3D che uniscono i punti di massima profondità di ogni sezione. Nei canali principali è stato necessario inserire più linee parallele agli assi. Anche in questo caso sono state inserite alcune linee di aiuto per raccordare i fondali con la terra emersa. Sono stati elaborati in totale circa 3000 punti canale, 6200 punti laguna, 300 polilinee 3D bordi canale, 220 polilinee 3D assi canale, 50 polilinee 3D varie (Figura 4.18).

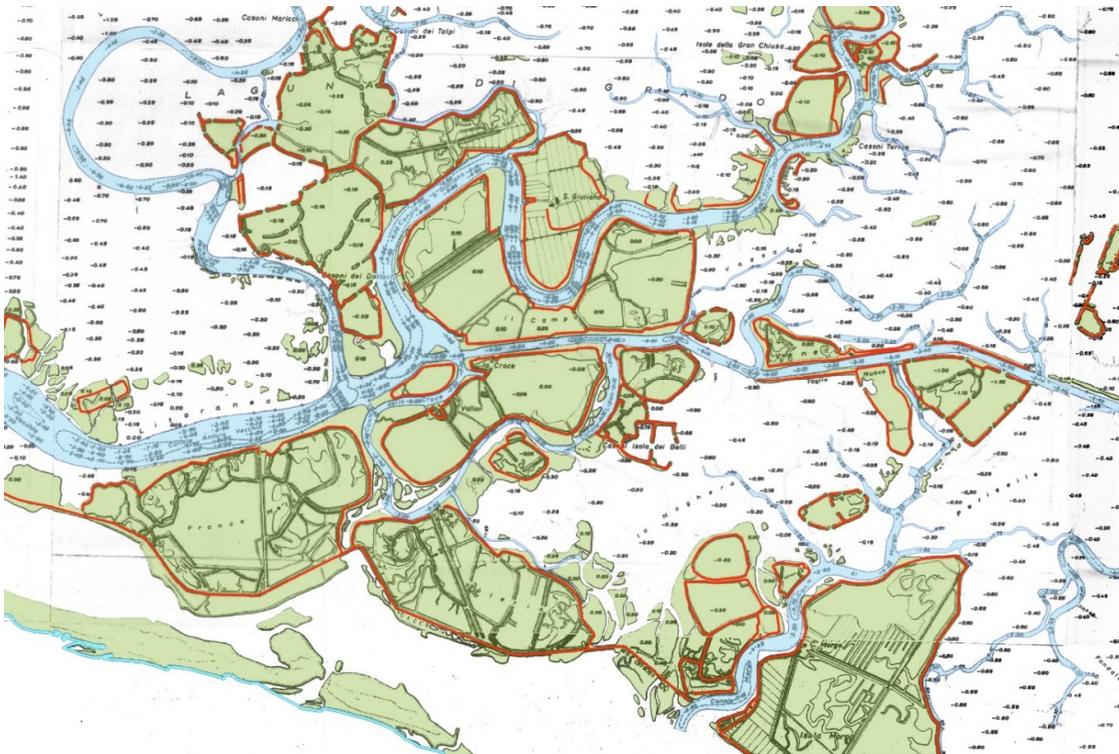


Figura 4.17. Stralcio della digitalizzazione effettuata a partire dalla carta idrografica del Dorigo (1966)

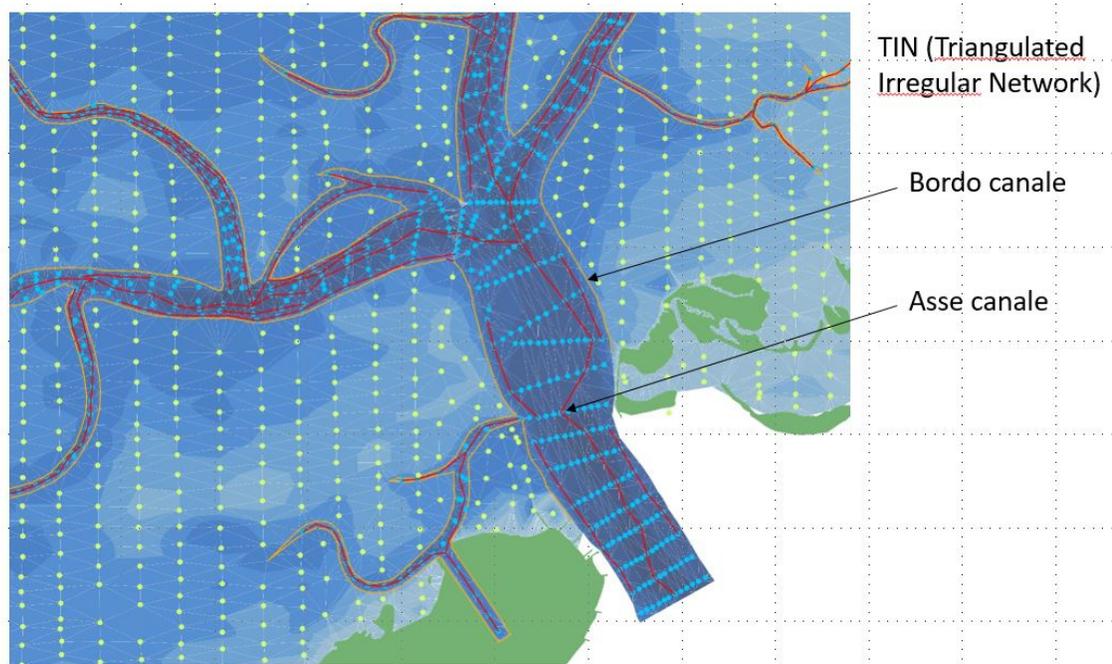


Figura 4.18. Esempio degli elementi vettoriali ausiliari creati per la costruzione del TIN.

Per la levata più recente (Triches et al., 2011) era già disponibile il modello TIN, ma dato lo scopo diverso dalla semplice rappresentazione bidimensionale delle batimetrie, è stata necessaria una revisione dello stesso al fine di ottenere risultati attendibili. A tal fine sono state prodotte alcune ulteriori feature lineari per aiutare il software a creare un modello tridimensionale geometricamente corretto, soprattutto per quanto riguarda i raccordi tra i canali e i fondali adiacenti. Sono stati quindi digitalizzati tutti i bordi canale con le relative quote e sono state aggiunte ulteriori polilinee quotate per migliorare la modellizzazione del passaggio velma-barena e dei canali minori rilevati in single-beam. Sono stati elaborati in totale circa 688000 punti single beam, più di 24.000.000 di punti multibeam, 50 polilinee 3D bordi canale e circa 40 polilinee 3D varie. Dai modelli TIN delle due levate batimetriche sono stati estratti i raster con cella a 1 m (*grid*) per non perdere i dettagli dei piccoli canali, sebbene la densità dei dati batimetrici, multibeam a parte, non giustificerebbe tale dettaglio.

A partire dai raster di ogni levata sono state quindi calcolate le ipsometrie, ovvero la distribuzione percentuale delle varie categorie batimetriche.

Infine è stata prodotta una mappa delle variazioni altimetriche per differenza tra i raster delle due levate batimetriche (Figura 4.19).

Effettuare il confronto tra i due pacchetti di dati e le relative mappe morfo-batimetriche, risulta, rispetto a quanto fatto per la Laguna di Venezia, relativamente semplice per quanto riguarda il riferimento piano altimetrico. I dati relativi alla Carta del 1966, infatti, se pur acquisiti in diverse campagne di misure e in fasi successive, erano stati, in fase finale, interamente riferiti al Datum verticale IGM 1942, corrispondente al livello medio del mare registrato a Genova nel 1942 (Dorigo, 1966). Per quanto riguarda invece la carta del 2011, il rilievo è stato effettuato in un unico sistema di riferimento piano-altimetrico, in coordinate Gauss-Boaga, Fuso Est, sistema di riferimento utilizzato nella Cartografia Tecnica Numerica della Regione Friuli Venezia Giulia. Il Datum verticale utilizzato è sempre IGM42. I dati risultano, pertanto, facilmente confrontabili.

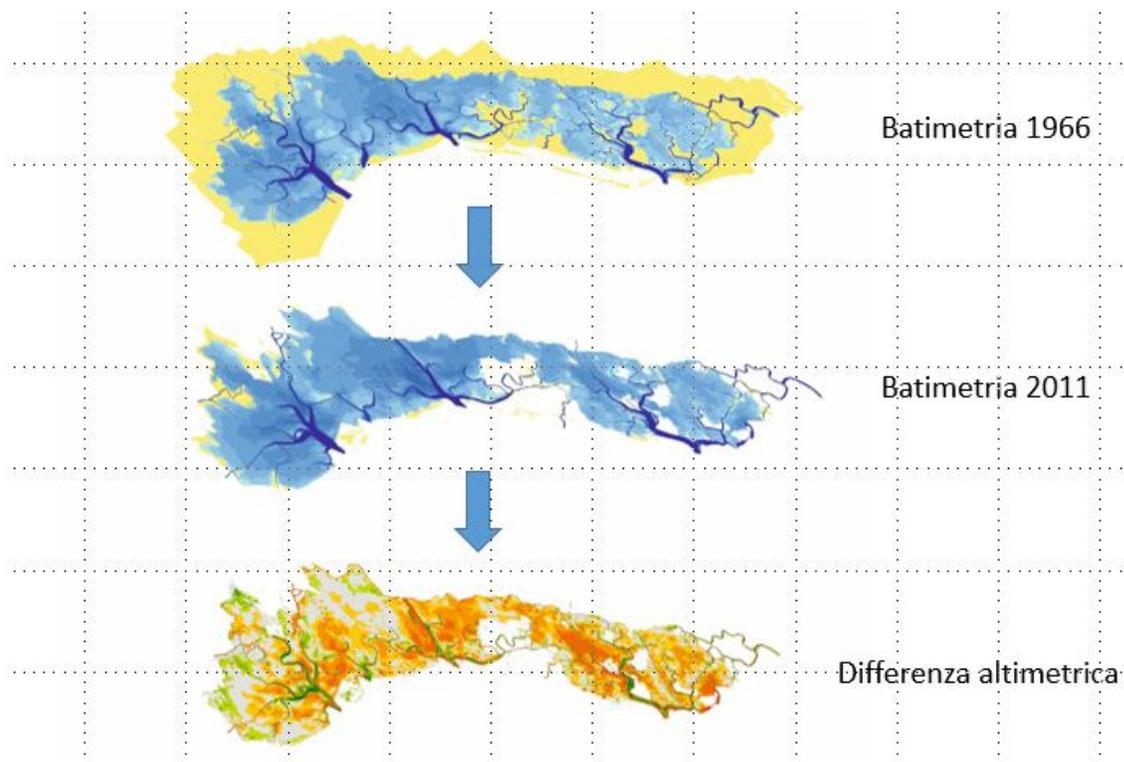
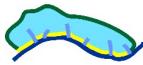


Figura 4.19. Schema logico di costruzione della carta delle differenze altimetriche

#### 4.3.2. L'ipsometria della laguna: confronto evolutivo

Il primo approccio per l'analisi morfologica quantitativa della laguna attuale e passata parte dalla suddivisione delle superfici lagunari in intervalli altimetrici predefiniti. Si è scelta una suddivisione in 12 classi altimetriche a partire dalle quali è stata ricavata l'estensione di ogni intervallo altimetrico espresso in ettari e in percentuale sull'intera area lagunare analizzata. Ne risultano i dati di Tabella 4.3. In questa fase sono state escluse dai dati le aree emerse (quota >0 rispetto al livello di riferimento IGM 1942) che nella digitalizzazione del Dorigo non sono state classificate a seconda della morfologia di appartenenza (barene, argini, isole). Esse non essendo direttamente ascrivibili a una categoria univoca di morfologia lagunare non sono confrontabili con quelle della batimetria più recente dove sono state inserite soltanto le barene. Il risultato ottenuto a partire dalla cartografia digitalizzata del Dorigo è rappresentato nella mappa di Figura 4.20 e dal grafico di Figura 4.21.



Tabella 4.3. Dati ipsometrici relativi alle due batimetrie della laguna analizzate.

intervalli prof. (m)	1964		2009	
	ha	%	ha	%
da -0,25 a 0	1777.1	13.6	526.1	4.4
da -0,5 a -0,25	2883.1	22.1	1593.3	13.2
da -0,75 a -0,5	3042.1	23.3	2610.7	21.6
da -1 a -0,75	2955.4	22.7	3285.7	27.2
da -1,25 a -1	1047.3	8.0	2243.2	18.6
da -1,5 a -1,25	161.0	1.2	574.1	4.8
da -2 a -1,5	144.8	1.1	260.9	2.2
da -5 a -2	604.6	4.6	676.8	5.6
da -10 a -5	398.9	3.1	270.7	2.2
da -15 a -10	24.4	0.2	25.0	0.2
< -15	0.4	0.0	0.0	0.0
TOT	13039	100	12067	100

Appare evidente dal grafico come la distribuzione sia caratterizzata da una netta prevalenza in termini di area delle classi comprese entro 1 m di profondità. La distribuzione presenta una “moda” (intesa come picco di frequenza) che corrisponde alla classe compresa fra -0.75 e -0.5 m, anche le classi adiacenti hanno frequenza superiore al 20%, segue in ordine di importanza la classe meno profonda (tra 0 e -0.25). Come evidenziato dalla mappa corrispondente (Figura 4.21). Le prime tre classi (entro la profondità -0.75) caratterizzano soprattutto la laguna di Grado, mentre la successiva copre ampie aree (superficie totale del 22.7 %) esclusivamente nel bacino di Lignano e in quello di Buso, soprattutto nella sua porzione occidentale, la classe non è rappresentata invece nel bacino di Grado, Morgo e Primero. La classe compresa tra -1 e -1.25 m mostra una frequenza inferiore a quelle citate finora e interessa solo una modesta parte dei fondali del bacino di Lignano e di quello di Buso esclusivamente nella porzione occidentale. Anche la classe successiva (-1.25 e -1.5 m) si presenta solo in questi bacini ma si tratta di una classe con bassissima frequenza che caratterizza soltanto modeste parti di fondale posizionate al bordo di canali. A partire da -1.5 m troviamo esclusivamente i canali, il cui peso in termini areali rispetto a tutta la laguna è ovviamente secondario.

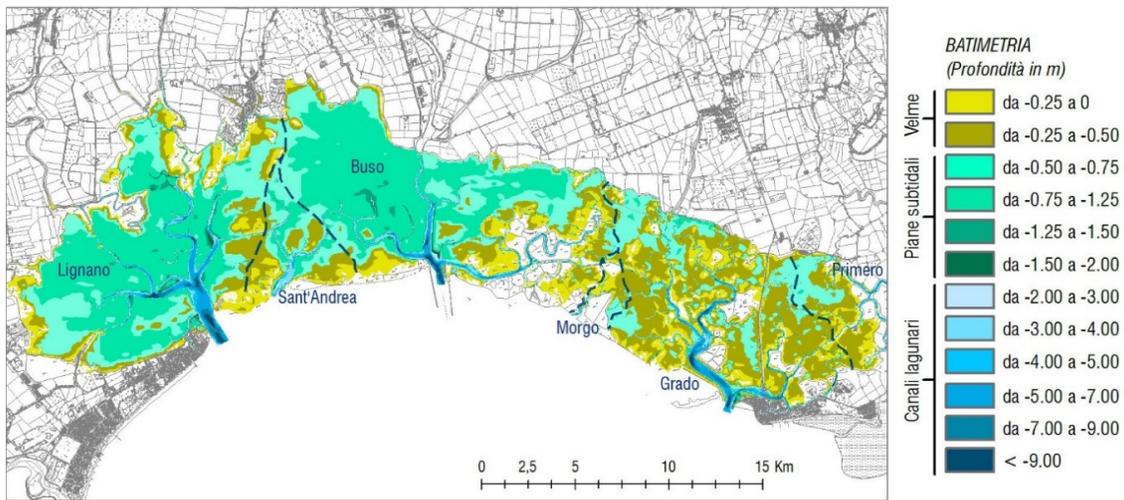
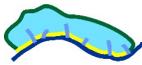


Figura 4.20. Immagine della mappa digitale risultante dall'elaborazione della Carta Idrografica del Dorigo con evidenziati i differenti intervalli batimetrici.

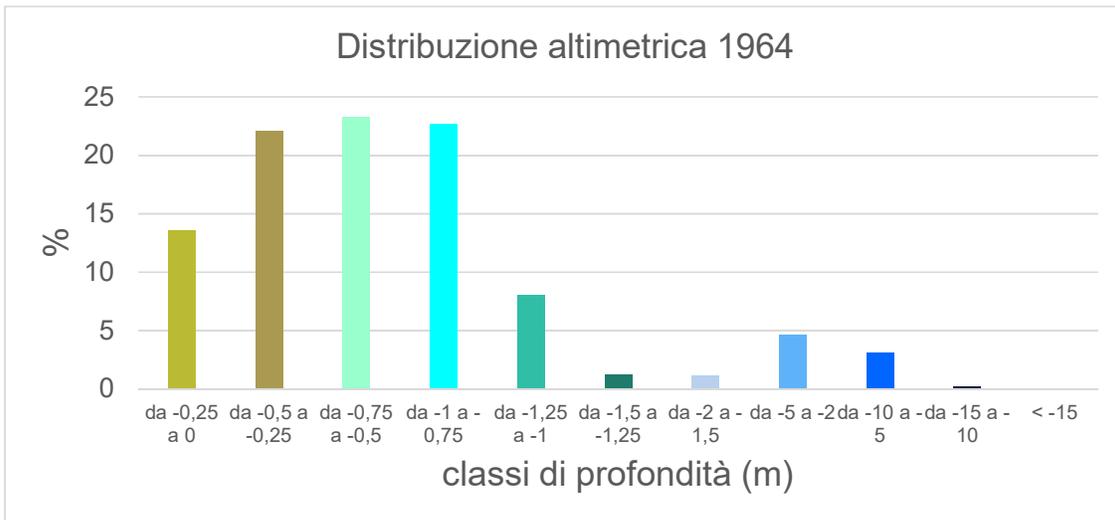


Figura 4.21. Distribuzione altimetrica della laguna ricavata dalla carta del Dorigo.

Analogamente sono presentati i risultati relativi alla batimetria del 2009 nella mappa di Figura 4.22 e nel grafico di Figura 4.23 .Figura 4.23. Distribuzione altimetrica della laguna ricavata dalla carta batimetrica del 2009.

Già a un primo esame visivo delle due carte appare evidente come la trasformazione della laguna sia stata significativa e diffusa. Nel grafico relativo alla batimetria più recente, infatti la classe più frequente è quella compresa tra -0.75 e -1 m, al di sopra di questa profondità tutte le superfici si sono notevolmente ridotte sia in termini percentuali che assoluti. Le classi con profondità maggiore invece si sono espanse in modo evidente: ad esempio la classe -1- -1.25 ha raggiunto un'estensione pari al 18.6 %.

La classe -1.5 – 2 m che nel 1964 era di esclusiva pertinenza dei canali occupa attualmente il 2.2 % delle superfici e costituisce delle aree di fondale profondo nei bacini di Lignano e di Buso.

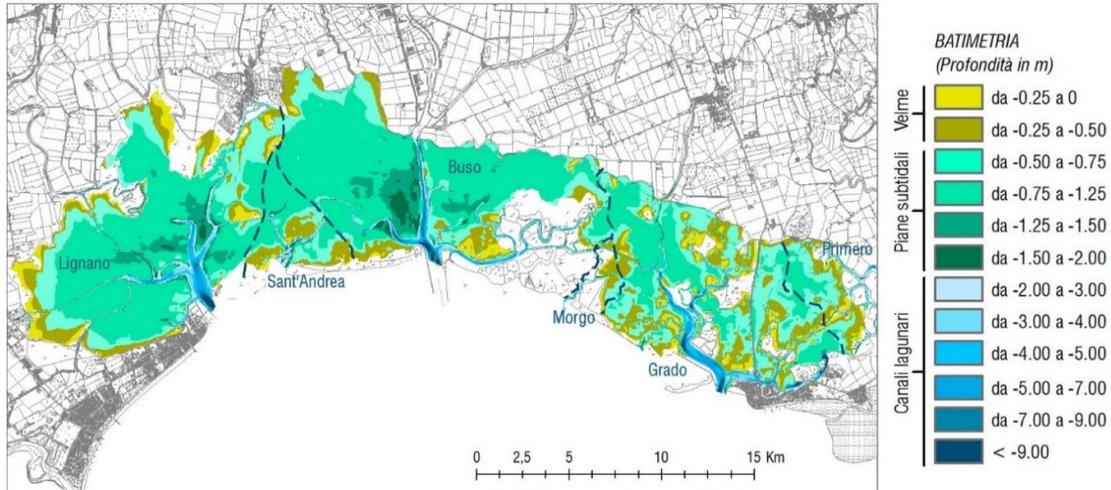
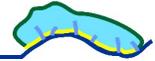


Figura 4.22. Immagine della mappa digitale risultante dall'elaborazione della carta batimetrica del 2009 con evidenziati i differenti intervalli batimetrici.

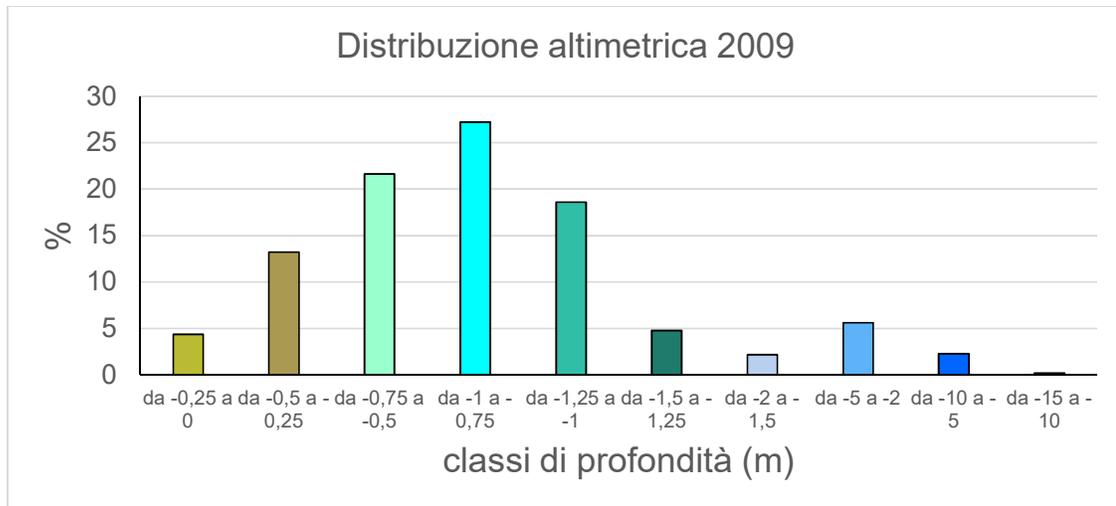


Figura 4.23. Distribuzione altimetrica della laguna ricavata dalla carta batimetrica del 2009.

Un modo utile di rappresentare i dati altimetrici è attraverso le curve di frequenza ipsometrica relative alle diverse classi di profondità individuate, curve che vengono utilizzate quale utile metodo di confronto sia spaziale che temporale.

Analizzando la rappresentazione dell'ipsometria del 1964 (Figura 4.24) si nota che la laguna assume una differente connotazione a seconda del bacino considerato.

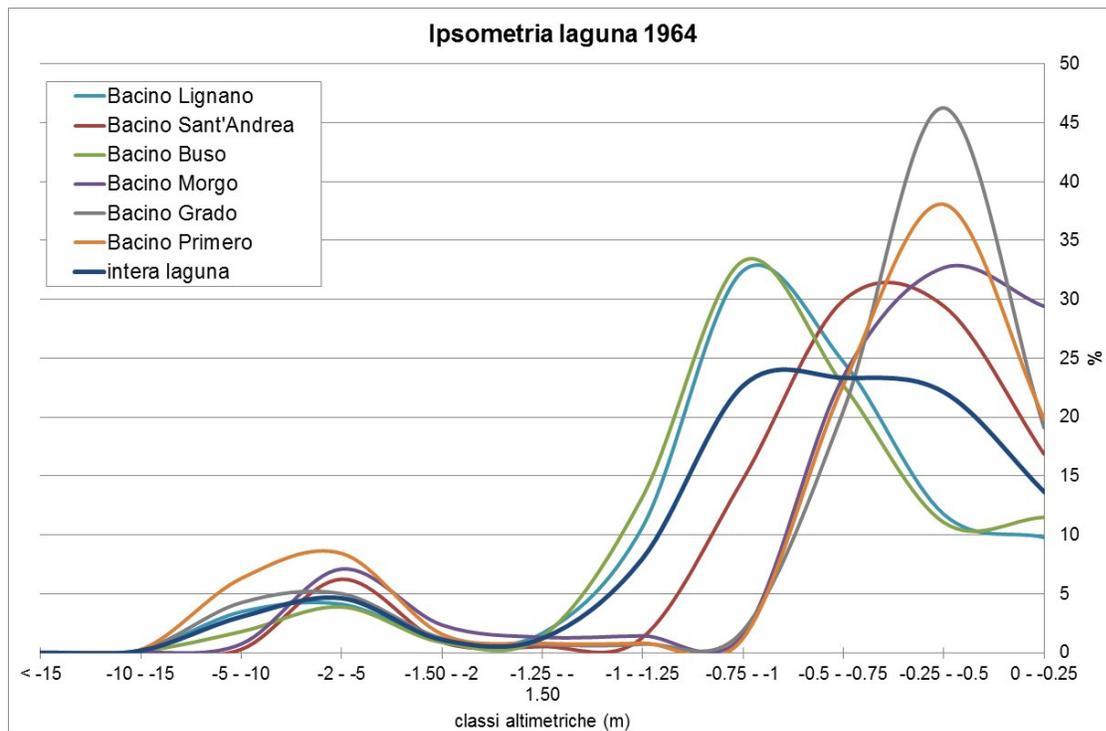
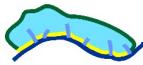


Figura 4.24. Distribuzione ipsometrica dei bacini che compongono la laguna di Marano e Grado in base alla batimetria del 1964.

In particolare è possibile evidenziare due modelli di distribuzione: il primo accomuna i bacini di Primero, Grado e Morgo ed è caratterizzato da una moda principale alla profondità tra -0,5 e -0,25 m ossia in corrispondenza dei fondali intertidali (velme), i quali costituiscono il 46% della superficie complessiva per Grado, il 38% per Primero e il 33% per Morgo. I fondali al di sotto della profondità -0,75 m non sono quasi per nulla presenti. Le profondità tra -2 e -5 m che corrispondono ai canali presentano una moda secondaria per tutti e tre i bacini ma che è tuttavia il risultato di un accorpamento di classi batimetriche. Un secondo modello ipsometrico accomuna i bacini di Lignano e Buso: la classe modale principale corrisponde alle profondità comprese tra -1 e -0,75 m (piane subtidali) con percentuali molto simili per i due bacini (32% e 33% rispettivamente); vi è poi la moda secondaria corrispondente ai canali (tra -2 e -5 m) già riscontrata nel caso precedente. Per il bacino di Lignano le velme risultano scarsamente rappresentate rispetto agli altri bacini.

Questi due modelli così macroscopicamente diversi possono essere imputati alle differenti origini e maturità dei due sistemi lagunari: il sistema Buso-Lignano ossia la laguna di Marano, più antica e con caratteri più simili a una baia e il sistema di Morgo, Grado e Primero ossia la laguna di Grado, più recente e ricca di irregolarità e complessità morfologiche.

Il bacino di S. Andrea che mostra caratteri intermedi tra i due modelli appena descritti, appartiene alla laguna di Marano, ma rappresenta un caso particolare per le sue ridotte dimensioni.

La curva che rappresenta l'ipsometria complessiva della laguna è una fusione delle due e mostra pertanto due mode molto vicine in corrispondenza delle velme e delle piane subtidali.

Confrontando le curve con quelle corrispondenti dell'ipsometria ricavata dai dati batimetrici più recenti (2011) si nota una significativa modifica nelle curve di ciascun bacino e diviene meno evidente l'identificazione dei due modelli precedentemente individuati (Figura 4.25).

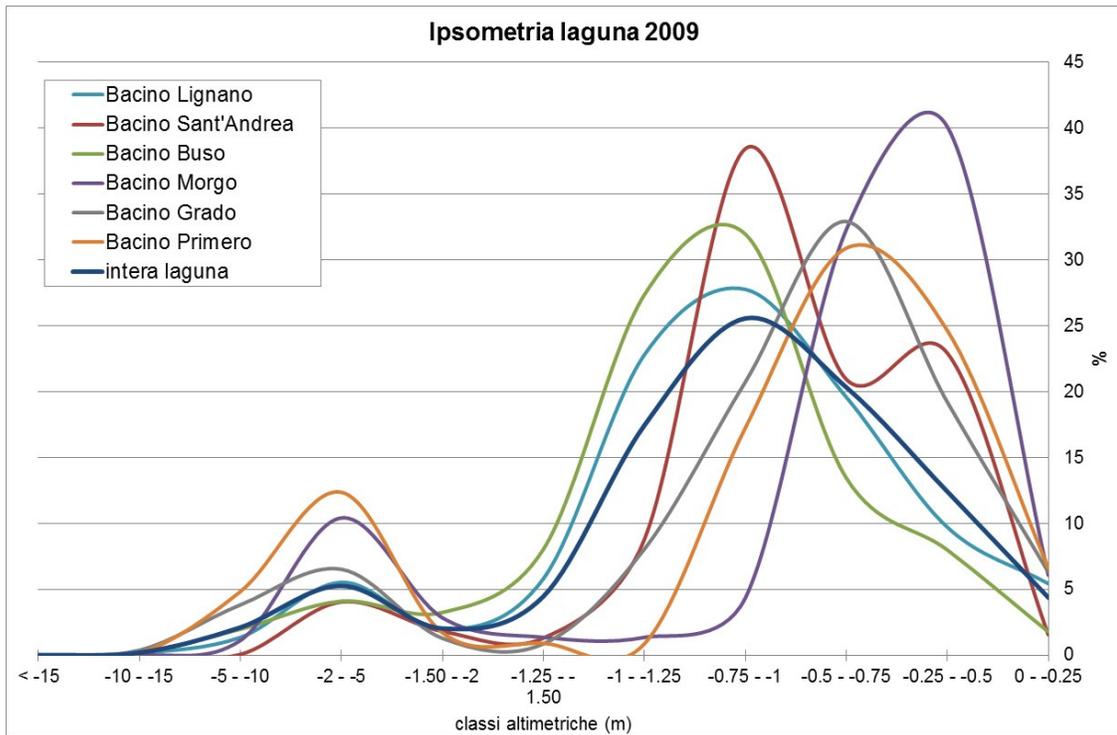
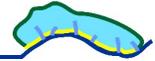


Figura 4.25. Distribuzione ipsometrica dei bacini che compongono la laguna di Marano e Grado in base alla batimetria del 2009.

Per semplificare visivamente i confronti essi sono rappresentati nei grafici di Figura 4.26, Figura 4.27, suddivisi per bacini.

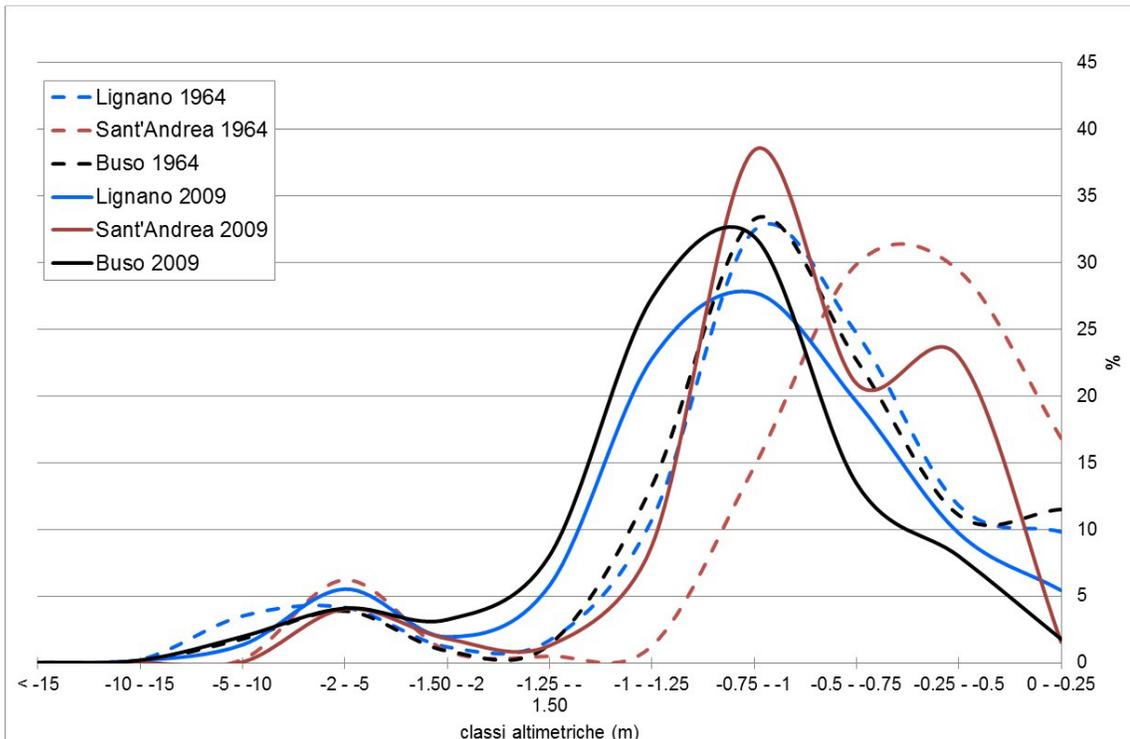


Figura 4.26. Confronto delle ipsometrie per i bacini di Lignano, Sant'Andrea e Buso.

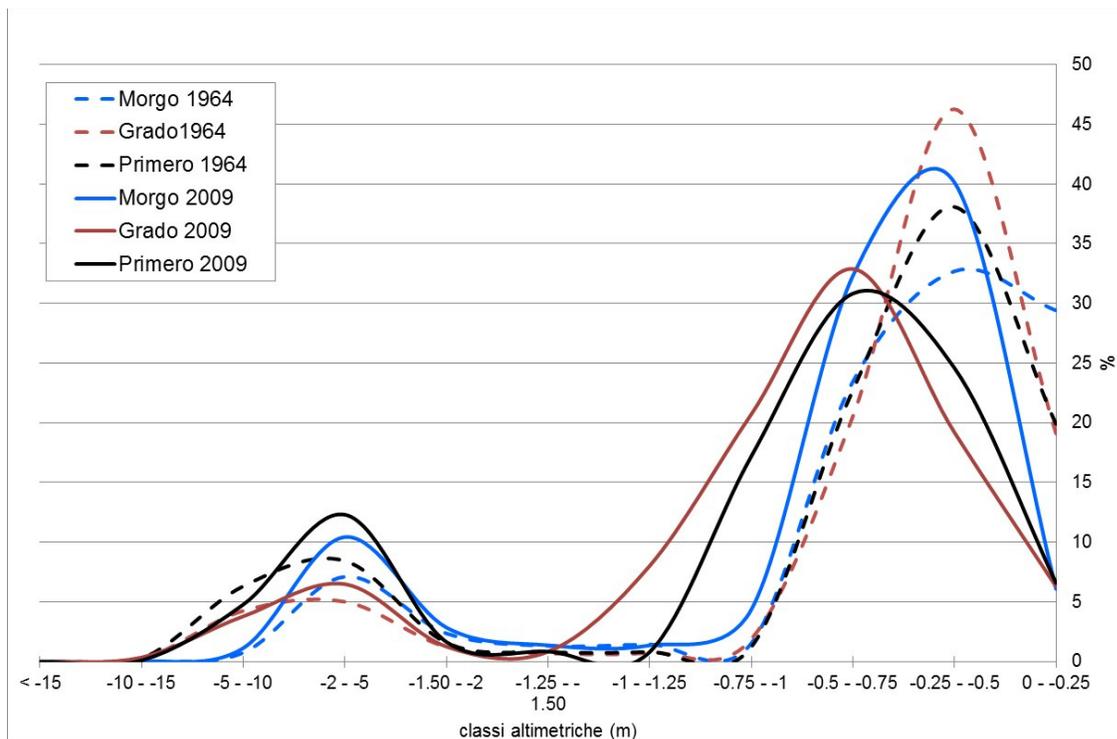
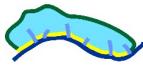
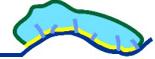


Figura 4.27. Confronto delle ipsometrie per i bacini di Grado, Morgo e Primero.

Sia Lignano che Buso mostrano una significativa traslazione delle curve di frequenza verso le profondità maggiori, pur rimanendo la moda principale nello stesso intervallo di classe. Si assiste a una significativa perdita per le aree a minor profondità e un altrettanto significativo guadagno per le aree più profonde (tra -1 e -1.5 m), che divengono più frequenti.

Anche per i bacini di Primero e Grado si assiste a una traslazione della curva verso le profondità maggiori, ma il fenomeno qui appare molto più importante, con uno slittamento della moda principale nella categoria delle piane subtidali (tra -0.5 e -0.75 m) e una riduzione molto importante a carico delle velme. Il bacino di Morgo invece mostra una traslazione molto più contenuta anche se dello stesso segno: è il bacino che più di tutti conserva la sua connotazione originale e mantiene (come si vede nel confronto complessivo) uno stile "gradese", mentre Grado e Primero si spostano verso una conformazione più "maranese". Infine il bacino di Sant'Andrea presenta le modifiche più rilevanti con un significativo approfondimento delle piane e l'assunzione di una caratteristica marcatamente "maranese". Ciò soprattutto in seguito all'escavo del canale di collegamento tra la foce dell'Aussa - Corno e la bocca di Porto Buso (negli anni '70) che ha modificato fortemente le caratteristiche del bacino di Buso ampliandone l'estensione a spese soprattutto di quello di Sant'Andrea (Brambati, 1996) e ha modificato significativamente l'idrodinamica lagunare.



### 4.3.3. La carta delle differenze

L'analisi delle variazioni dell'altimetria della laguna è stata eseguita sulla base del confronto tra la Carta batimetrica del 1964 (Dorigo, 1966) e quella del 2009 (Triches et al., 2011), per una superficie complessiva comune di circa 12838 ha. L'area di lavoro ricopre tutta la zona delle barene del 2009, escludendo le isole, le valli da pesca, la spiaggia e le aree perilagunari comprese tra le isole barriera e i banchi esterni. Sono inoltre escluse le aree non rilevate nella carta batimetrica del 2009.

La carta delle differenze ottenuta grazie alle sovrapposizioni dei modelli digitali delle due carte (Figura 4.28) e presentata in allegato (Tav. 1) è uno strumento che consente di individuare con immediatezza le aree della laguna stabili, quelle che hanno subito un approfondimento e quelle in accumulo. Consente altresì di quantificare il fenomeno e di analizzarlo a scala di intera laguna e di singolo bacino.

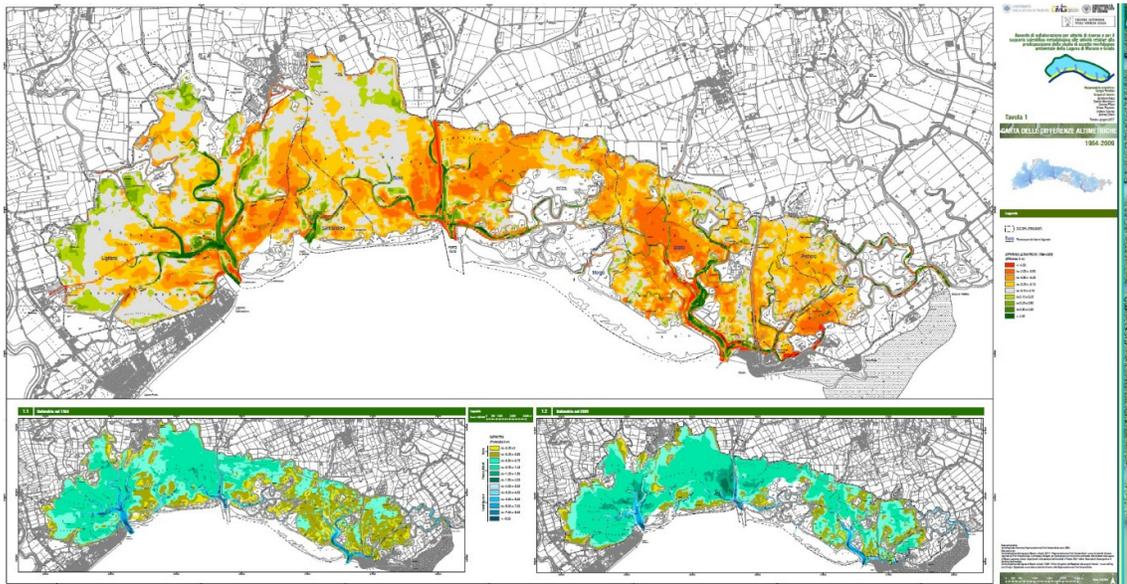


Figura 4.28. La Carta delle differenze presentata come Tavola 1.

Per descrivere il fenomeno della variazione altimetrica in maniera più immediata le aree sono state classificate come segue:

- **approfondimento elevato** (variazione altimetrica  $< -0.50\text{m}$  pari a un tasso di approfondimento /erosione maggiore di  $1\text{ cm /anno}$ )
- **approfondimento moderato** (variazione altimetrica compresa tra  $-0.50$  e  $-0.1\text{ m}$  pari a un tasso di approfondimento /erosione compreso tra  $-1$  e  $-0.2\text{ cm /anno}$ )
- **stabilità** (variazione altimetrica compresa tra  $-0.1$  e  $+0.1\text{ m}$  pari a un tasso di approfondimento /erosione compreso tra  $-0.2$  e  $+0.2\text{ cm /anno}$ )
- **accumulo o deposizione** (variazione altimetrica maggiore di  $+0.1\text{ m}$  pari a un tasso di sedimentazione maggiore di  $0.2\text{ cm /anno}$ )

La distribuzione delle classi è presentata nella mappa di Figura 4.29 e nel grafico di Figura 4.30.

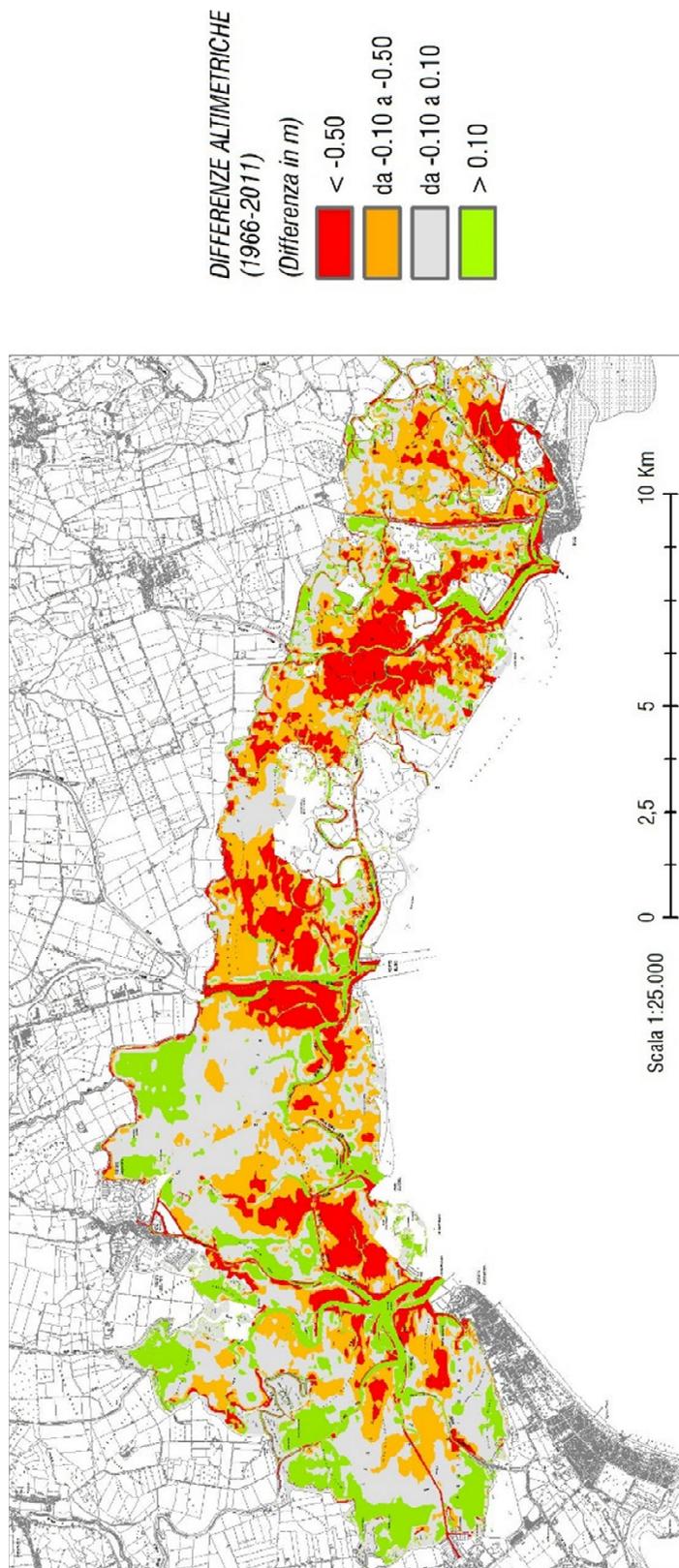
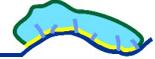


Figura 4.29. Versione semplificata della carta delle differenze riportante quattro classi di differenza altimetrica.



Grazie alla carta delle differenze e alla sua classificazione si evidenziano alcuni fenomeni generali di seguito descritti.

**Aree soggette a forte erosione / approfondimento dei fondali:** l'approfondimento elevato caratterizza in tutto 1427 ha (pari all'11 % dell'area analizzata) situati in aree adiacenti ai canali principali che afferiscono alla bocca di Lignano, lungo il partiacque teorico tra il bacino di Lignano e quello di Sant'Andrea, in un'area alle spalle dell'isola di Martignano, in un'area immediatamente a sud della litoranea veneta nel tratto posto alle spalle dell'isola di Sant'Andrea, sul lato occidentale del canale Ausa Corno – Porto Buso, nella porzione occidentale del bacino di Grado incentrata sul canale Taiada a coinvolgere il Fondale delle Oche, nella porzione orientale del bacino di Grado a sud del canale di Barbana. Nelle aree soggette ad approfondimento sono compresi gli escavi di alcuni canali artificiali o darsene realizzati nell'intervallo di tempo tra i due rilievi (per il dettaglio si veda la Tabella 4.4 e la mappa relativa Figura 4.31).

**Aree soggette a erosione / approfondimento moderati:** è la classe più estesa che occupa una superficie di 5357 ha, pari al 41.8 % della superficie lagunare; risulta talmente estesa da diventare di difficile descrizione dal punto di vista geografico.

**Aree stabili:** seconda classe in termini di estensione, corrispondono a 4026 ha pari al 31.4 % della superficie lagunare analizzata; nel bacino di Lignano occupano una vasta area che si dispone a fascia approssimativamente parallela al margine lagunare, una zona molto ampia è presente nella parte occidentale del bacino di Buso e un'altra di dimensioni più ridotte in quella orientale a nord delle isole della Gran Chiusa. Il bacino di Grado presenta poche aree stabili, non particolarmente estese, tra cui una fascia con andamento parallelo al terrapieno della strada statale Aquileia - Grado sul lato ovest e una quasi continua lungo il margine settentrionale della laguna.

**Aree di deposizione:** corrispondono a una superficie complessiva di 1994 ha pari al 15.6 % del complessivo; sono presenti quasi esclusivamente lungo i margini lagunari del bacino di Lignano e nella porzione occidentale del bacino di Buso. All'interno di questa classe ricade anche il fenomeno dell'interrimento dei canali che riguarda gran parte dell'idrografia lagunare e che ha portato in molti casi alla scomparsa del canale stesso.

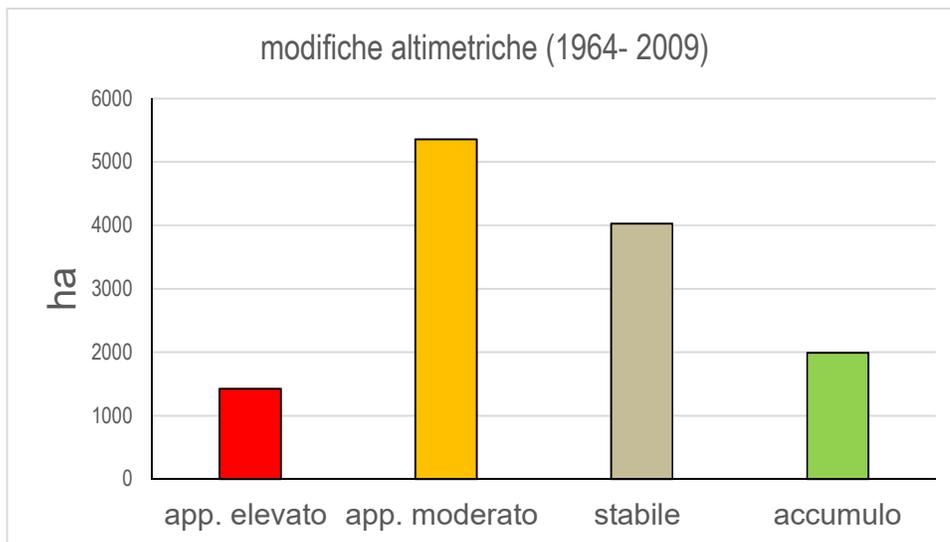
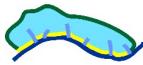


Figura 4.30. Istogramma che mostra la distribuzione dei differenti gradi di variazione altimetrica sull'intera laguna.

Tabella 4.4. Principali lavori di escavo realizzati nell'intervallo di tempo 1964-2009

LAVORI ESCAVAZIONE 1964-2009		Bacino di riferimento
1	Darsena Aprilia Marittima + canale collegamento	Lignano
2	Interventi vari (Canale di Marano)	Lignano
3	Canale Aussa Mare	Buso
4	Piccolo canale Ovest di collegamento tra Taglio Nuovo e Canale Lipan	Buso
5	Canale Moreri (bonifica Cavarera e Schiusa)	Grado
6	Interventi vari	Grado
7	Piccolo canale Est di collegamento tra Taglio Nuovo e Canale Lipan	Morgo

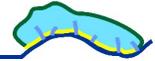


Figura 4.31. Ubicazione in Laguna di Marano (in alto) e di Grado (in basso) dei principali interventi antropici (cfr. Tabella 4.4) di escavo di canali e darsene realizzati nell'intervallo di tempo 1964-2009.

Una lettura più accurata dei processi di trasformazione morfologica della laguna può essere ottenuta dall'analisi delle variazioni subite da ciascuna categoria altimetrica che rappresenta le varie morfologie lagunari.

Nella Tabella 4.5 e in Figura 4.32 sono riportati i valori medi (unitamente a quelli minimi, massimi e deviazione standard per la sola tabella) delle differenze di elevazione dei fondali subite dal 1964 al 2009.

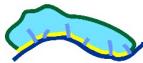


Tabella 4.5. Variazione di profondità (media, dev.st., min e max) entro le diverse categorie di profondità nel periodo 2009-1964. La distribuzione areale delle categorie si riferisce all'origine del confronto, cioè all'anno 1964.

PROF 1964 (m)	AREA (ha)	Variazione altimetrica 1964-2009 (m)			
		MIN	MAX	MEAN	STD
>0	761	-11.90	0.24	-0.29	0.90
0.2-0.4	1789	-14.32	1.93	-0.29	0.54
0.4-0.6	2296	-14.16	1.04	-0.23	0.42
0.6-0.8	2556	-14.09	1.04	-0.16	0.41
0.8-1	2235	-13.80	1.24	-0.16	0.47
0-0.2	945	-13.81	1.78	-0.29	0.70
1.2-1.4	202	-13.53	1.64	-0.09	0.71
1.4-1.6	66	-13.35	1.84	-0.18	1.18
1.6-1.8	48	-13.16	2.04	-0.15	1.34
1.8-2	45	-12.99	2.24	-0.08	1.38
1-1.2	937	-13.64	1.44	-0.12	0.40
2.2-2.4	39	-12.53	2.64	0.06	1.49
2.4-2.6	37	-12.27	2.84	0.16	1.52
2.6-2.8	36	-11.95	3.04	0.26	1.55
2.8-3.00	36	-11.63	3.24	0.38	1.57
2-2.2	41	-12.71	2.44	-0.03	1.46
<-3	736	-11.46	12.05	1.17	1.87

I dati mostrano che i valori più elevati di approfondimento si verificano per le aree emerse e le velme mentre tendono poi a decrescere con la profondità; dopo il valore limite di -2.2 m inizia invece un processo di sedimentazione la cui entità aumenta esponenzialmente con la profondità.

I risultati indicano quindi, come già verificato per il caso della laguna di Venezia, una tendenza alla semplificazione morfologica con approfondimento delle velme e interrimento dei canali.

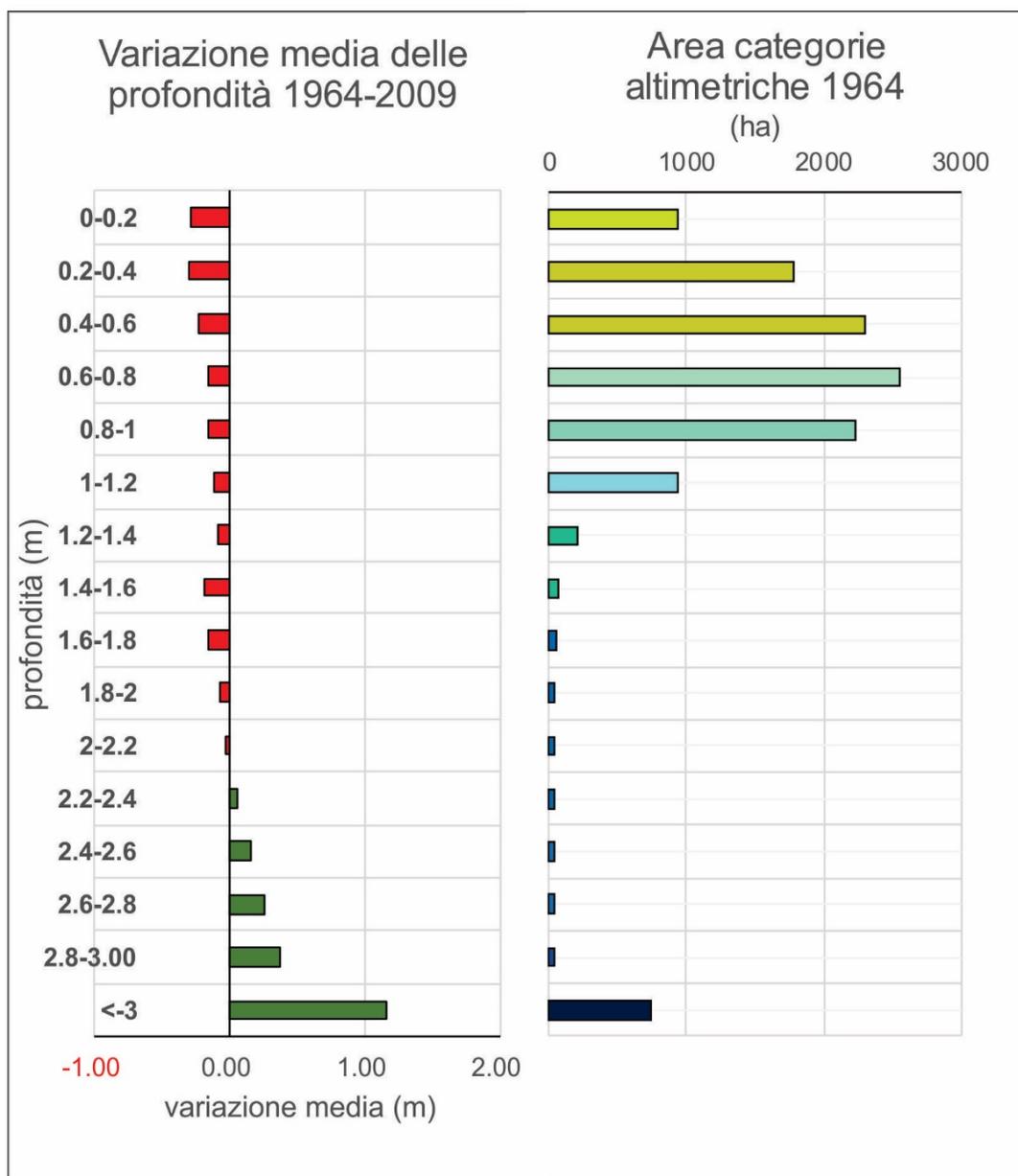
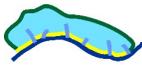


Figura 4.32. Diagramma delle variazioni altimetriche medie per intervalli di profondità di 0.2 m.



Questo processo di semplificazione morfologica e di approfondimento dei fondali può essere esemplificato attraverso una serie di sezioni in aree rappresentative. Nelle seguenti Figura 4.33, Figura 4.34, Figura 4.35, Figura 4.36, Figura 4.37 e Figura 4.38 sono quindi riportate sei sezioni batimetriche che mostrano una serie di situazioni tipo.

Nelle sezioni n. 1 e 3 (Figura 4.33 e Figura 4.35) sono evidenziati rispettivamente l'allacciante di Sant'Andrea (bacino di Lignano) e il Canale della Taiada (bacino di Grado), tratti di canale dove si è verificato un processo deposizionale a sfavore delle piane laterali, che risultano in approfondimento / erosione.

Nella sezione n. 2 (Figura 4.34) è visibile il vecchio canale Aussa, ora completamente interrato, accanto al nuovo tracciato del Canale Aussa Mare e si osserva comunque la generale situazione erosiva delle piane limitrofe.

La sezione n. 4 (Figura 4.36) illustra una situazione di intensa erosione dei fondali a nord dell'isola di Barbana accompagnata dalla scomparsa di un canale.

Nella sezione n. 5 (Figura 4.37) si nota un'area di deposizione nel lato settentrionale della Secca di Muzzana, con la scomparsa di un canale che costeggiava le barene, mentre spostandoci verso sud assistiamo all'erosione e appiattimento dei fondali.

Infine nella sezione n. 6 (Figura 4.38) è evidente l'interrimento del Canale Cialisia accompagnato però dall'accumulo nei fondali a est del canale stesso e da una situazione stabile a ovest.

Dall'analisi dei profili diventa evidente la tendenza della laguna a semplificare le forme di fondo, appiattendosi; questo è un segnale del fatto che i canali sono soggetti a una perdita di efficienza idraulica e quindi l'acqua che si incanala e scorre sul fondo non ha l'energia necessaria alla risospensione del materiale. Nelle zone di velma, invece, la profondità media è tale da subire maggiormente l'azione degli sforzi di taglio prodotti dalle onde e quindi l'influenza del vento favorisce i processi di erosione.

Il metodo utilizzato per ricavare lo stato evolutivo dei fondali non fornisce indicazioni dirette sulle sue cause. Infatti le differenze altimetriche registrate, che sono spesso di rilevante entità, non possono essere attribuite con certezza ed esclusivamente ai fenomeni erosivi, bensì potrebbero anche essere imputate a fenomeni di subsidenza localizzati e non.

Tuttavia, la tipologia e distribuzione delle differenze altimetriche unitamente alle evidenze geomorfologiche le rende, nella maggior parte dei casi, ragionevolmente ascrivibili a un processo di tipo morfodinamico, pur non escludendo il concorso di altri fenomeni quali l'abbassamento del suolo dovuto a subsidenza, come nel caso veneziano.

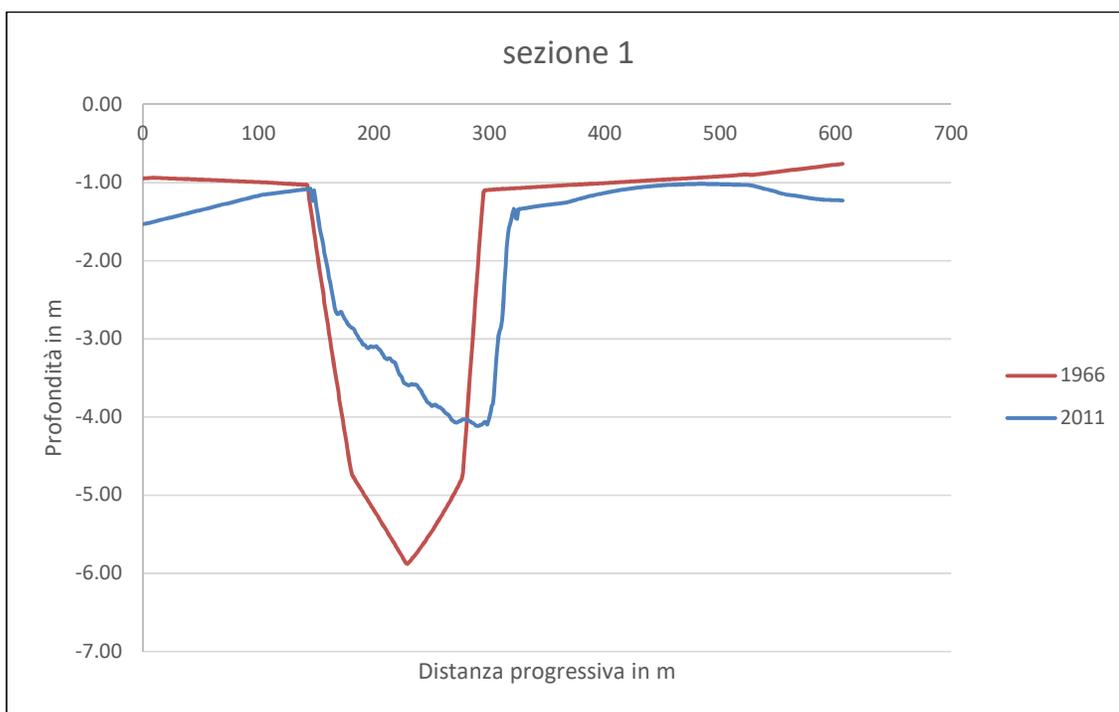
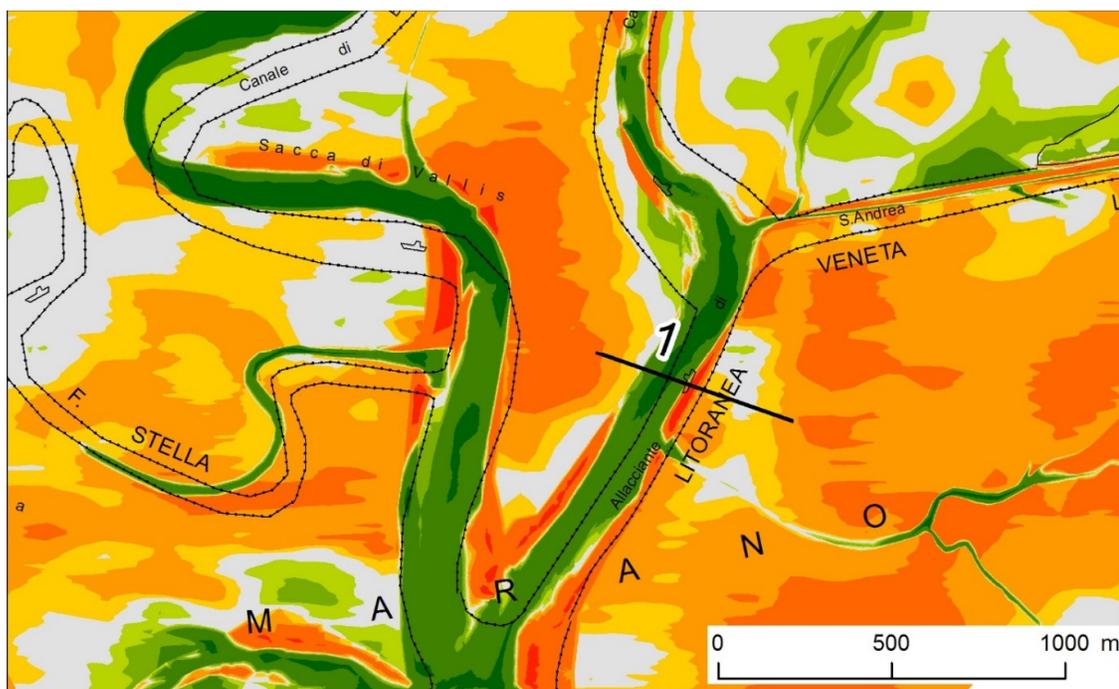
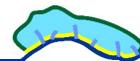


Figura 4.33. Esempio di sezione di confronto tra il 1964 ed 2009 e relativa ubicazione.

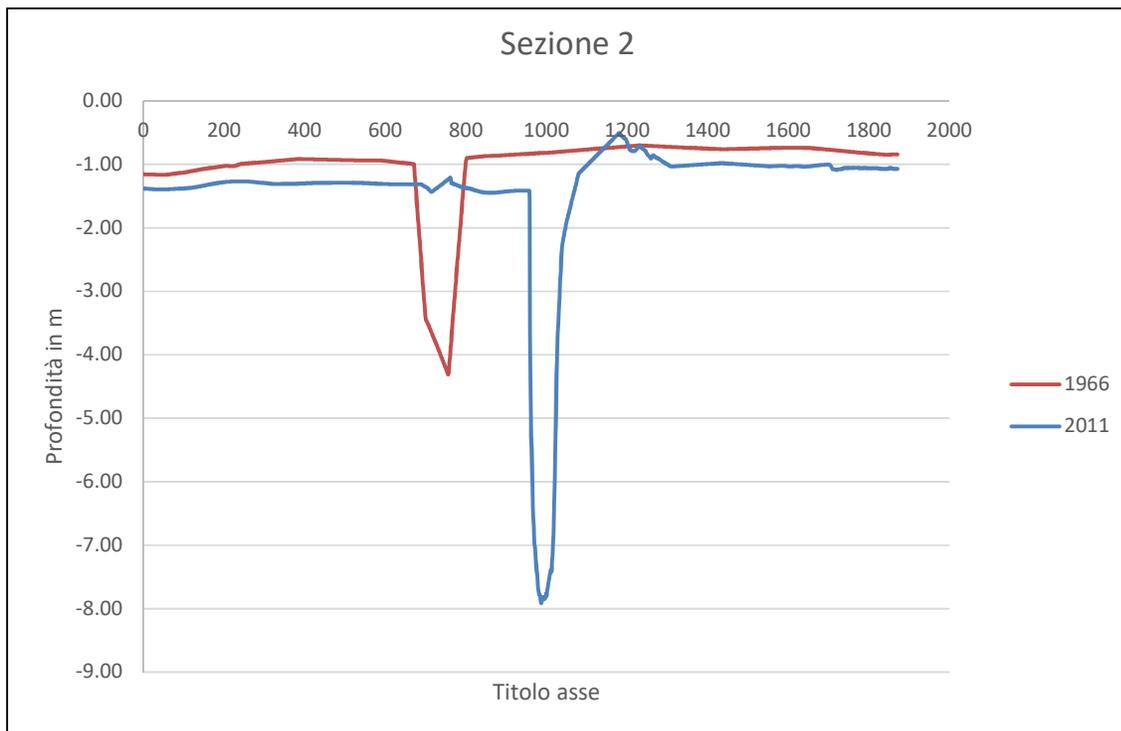
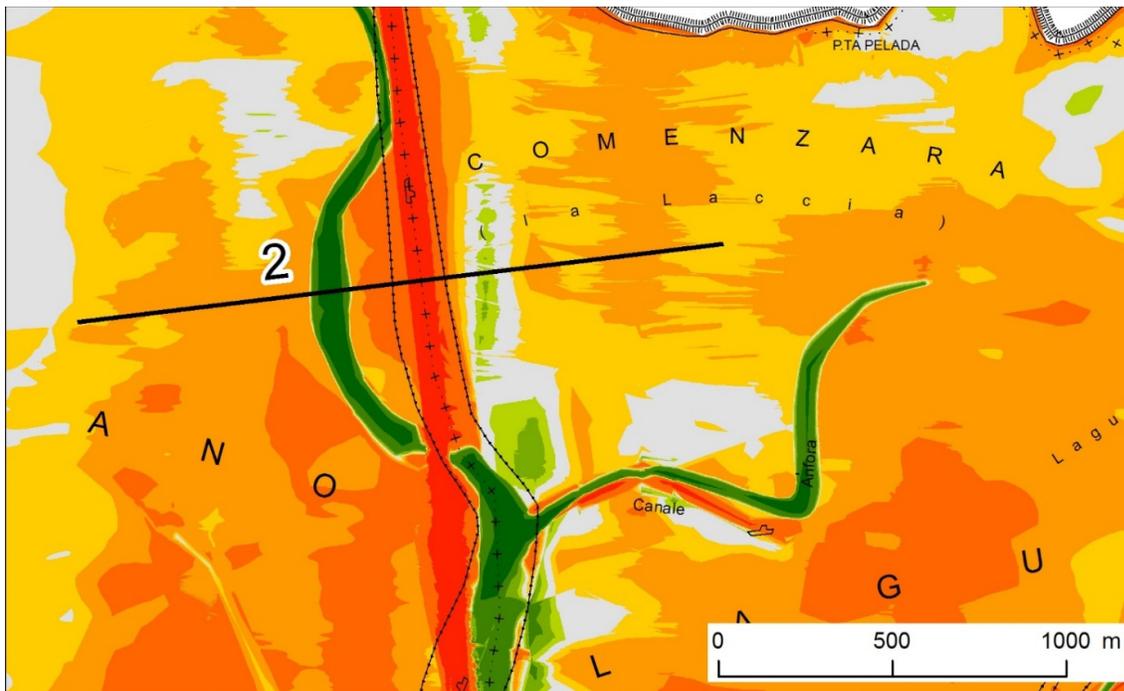
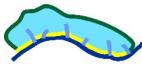


Figura 4.34. Esempio di sezione di confronto tra il 1964 ed 2009 e relativa ubicazione.

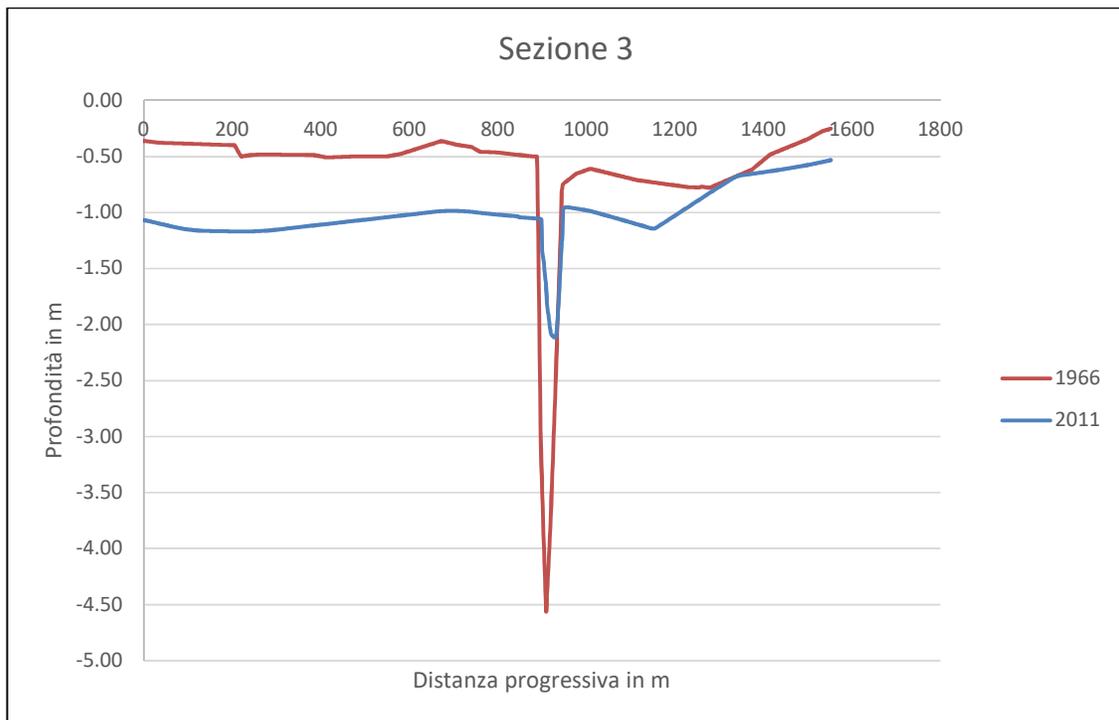
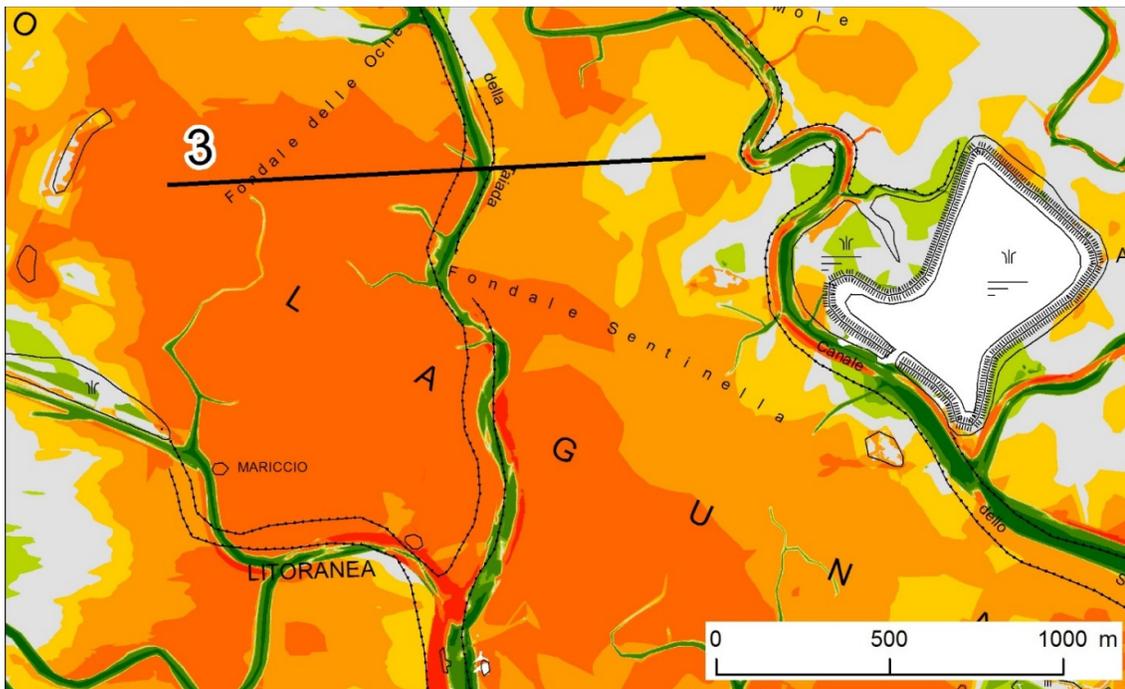
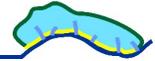


Figura 4.35. Esempio di sezione di confronto tra il 1964 ed 2009 e relativa ubicazione.

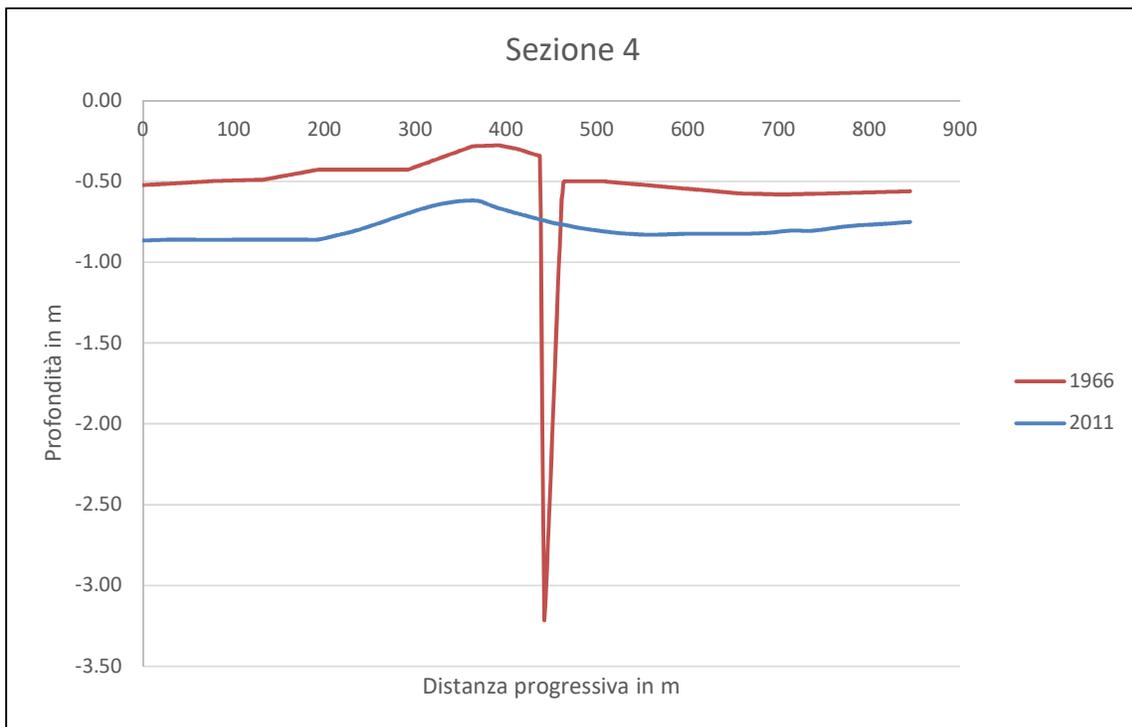
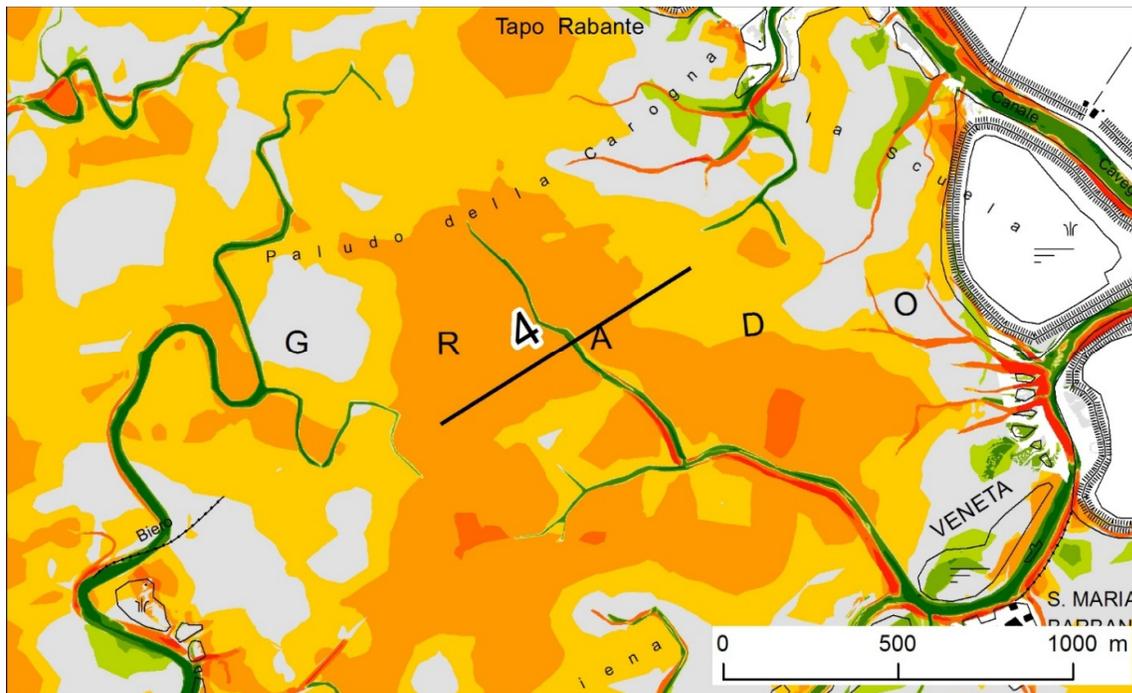
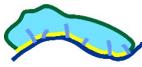


Figura 4.36. Esempio di sezione di confronto tra il 1964 ed 2009 e relativa ubicazione.

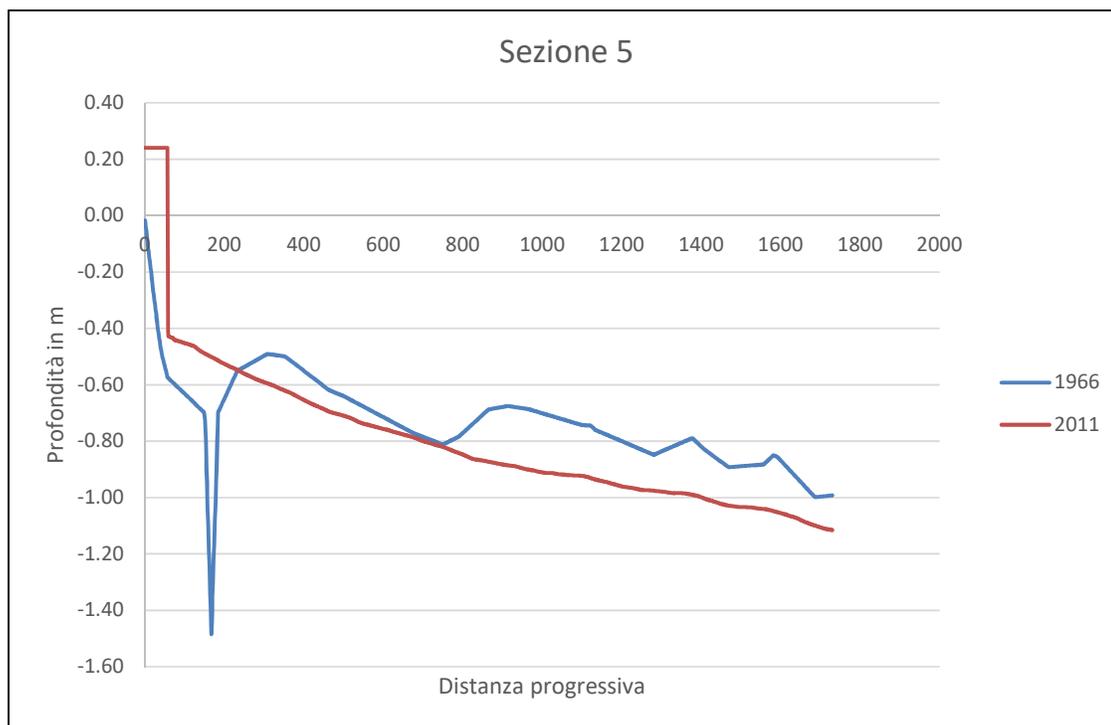
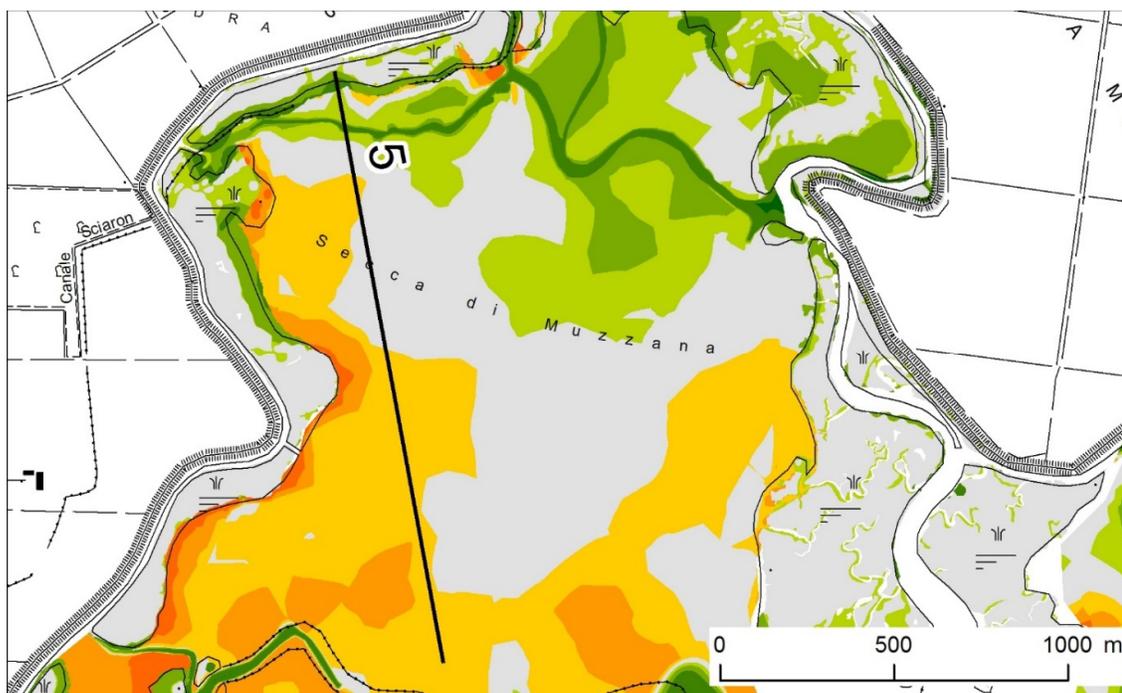
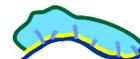


Figura 4.37. Esempio di sezione di confronto tra il 1964 ed 2009 e relativa ubicazione.

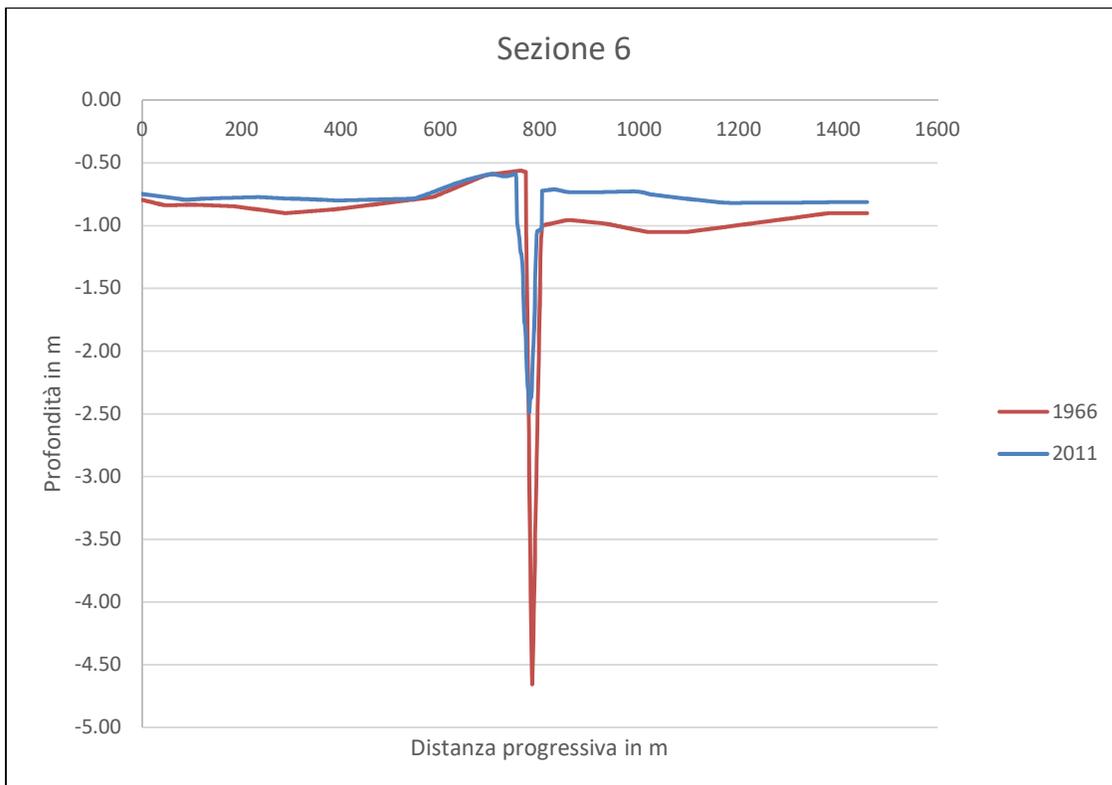
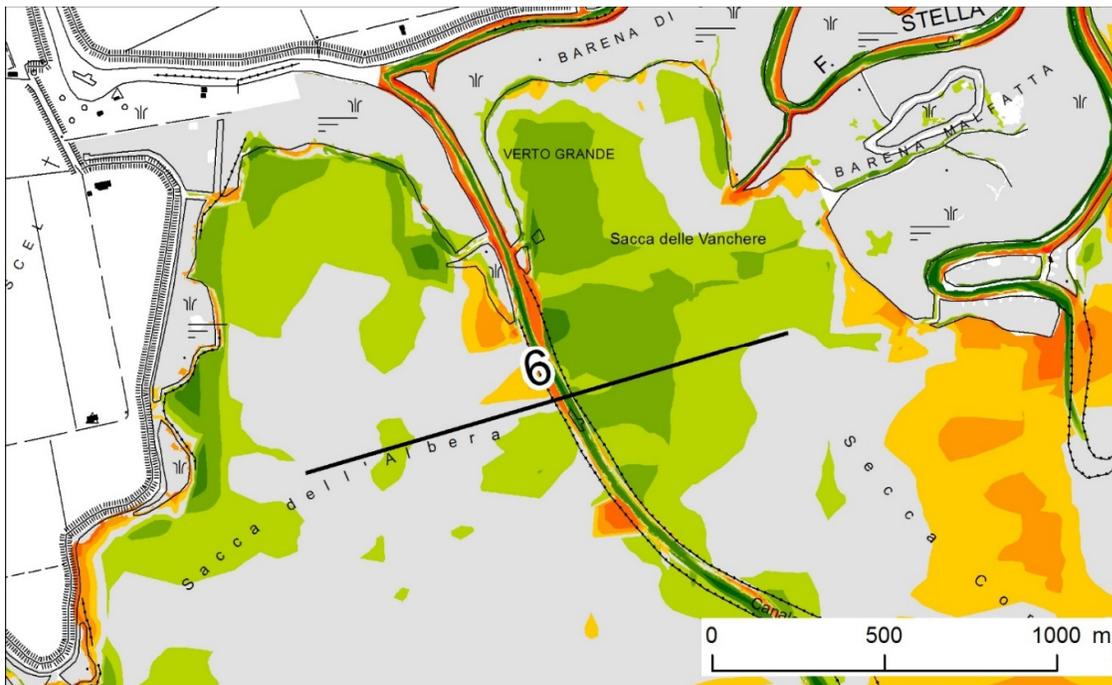
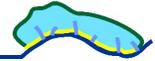


Figura 4.38. Esempio di sezione di confronto tra il 1964 ed 2009 e relativa ubicazione.



#### 4.4. Bilancio sedimentario

##### 4.4.1. Quantificazione del bilancio

Grazie all'elaborazione in GIS e alla costruzione della *Carta delle differenze* si è potuto analizzare il bilancio sedimentario globale per l'intera laguna: è stato cioè possibile calcolare il volume del materiale eroso e sedimentato, distinguendo le aree occupate dai canali e quelle interessate da fondali, velme e barene, raggruppate queste ultime tre in un'unica categoria. Nel grafico di Figura 4.39 e nella relativa tabella (Tabella 4.6) vengono riportati i volumi in mc relativi ai bilanci parziali delle due categorie morfologiche per ciascun bacino e per l'intera laguna nei 45 anni analizzati: ne risulta chiaramente il fenomeno di erosione che interessa nel complesso velme, barene e fondali e contemporaneamente l'interrimento dei canali con un tasso pari a 171906 mc /anno.

Tabella 4.6. Volumi in mc relativi ai bilanci parziali delle due categorie morfologiche per ciascun bacino e per l'intera laguna nei 45 anni analizzati.

Laguna Totale	fondali, barene	velme, canali	complessivo
Sommatoria (mc)	-22346494	7735762	-14610731
Tasso (mc/anno)	-496588	171905	-324682

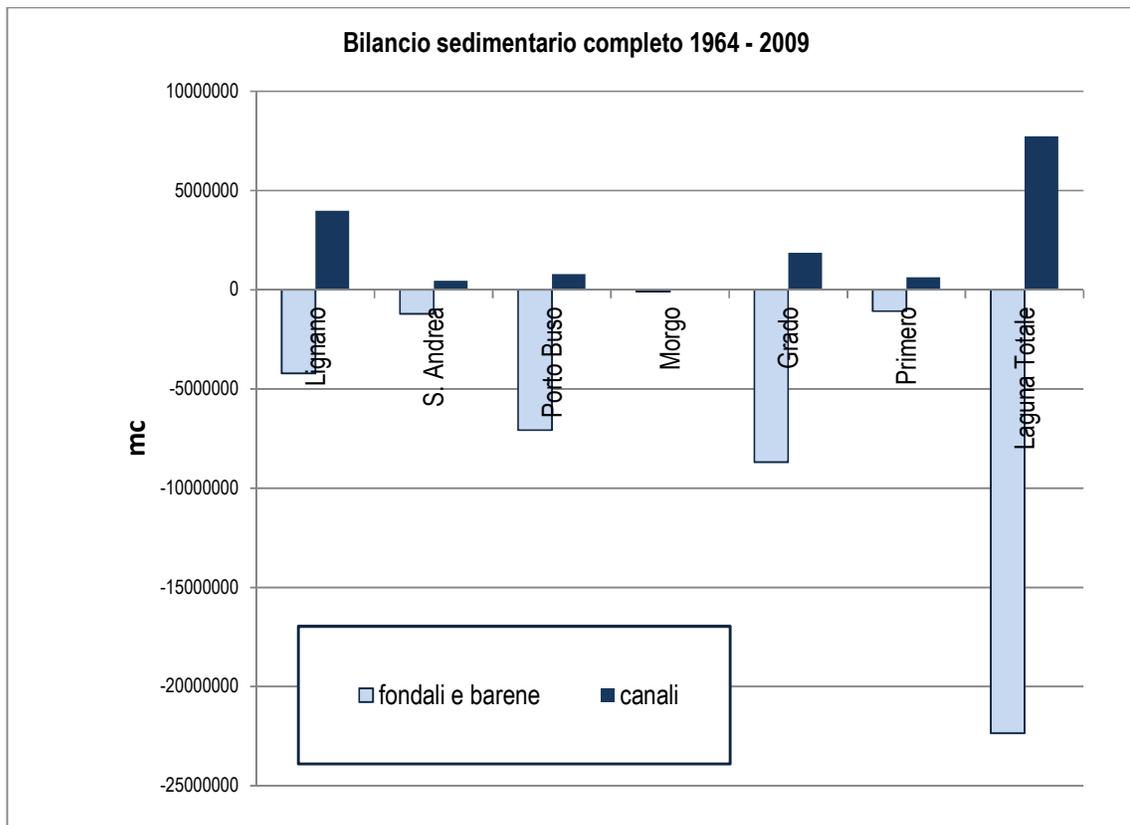
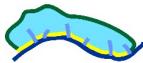


Figura 4.39. Bilancio sedimentario risultante dal confronto delle batimetrie 1964 e 2009.



Questo primo bilancio è stato successivamente corretto escludendo dal computo i principali interventi antropici avvenuti nel periodo di tempo considerato.

La ricostruzione degli interventi antropici in laguna appare alquanto complessa. Nell'ambito di questo progetto sono stati individuati i più importanti grazie ai documenti bibliografici disponibili, alla documentazione cartografica e alle foto aeree (cfr. paragrafo 4.2).

Gli interventi che sono stati quantificati e conseguentemente eliminati dal computo sono elencati in Tabella 4.7 e la loro ubicazione è mostrata in Figura 4.31. Sono stati considerati e quantificati esclusivamente gli interventi che ricadono all'interno della maschera di confronto utilizzata per la costruzione della carta delle differenze che esclude già di fatto le isole e tutte le aree che risultano antropizzate nella carta del 2011, ad esempio le valli da pesca.

Tabella 4.7. Interventi antropici in laguna durante il periodo 1964 – 2009 e relativa quantificazione ottenuta dalla carta delle differenze in GIS.

	LAVORI ESCAVAZIONE	Tot (mc)	Bacino di riferimento
1	Darsena Aprilia Marittima + canale collegamento	-443000	Lignano
2	Interventi vari (Canale di Marano)	-501252	Lignano
3	Canale Aussa Mare	-1011873	Buso
4	Piccolo canale Ovest di collegamento tra Taglio Nuovo e Canale Lipan	-1948	Buso
5	Canale Moreri (bonifica Cavarera e Schiusa)	-1084089	Grado
6	Interventi vari	-10744	Grado
7	Piccolo canale Est di collegamento tra Taglio Nuovo e Canale Lipan	-2583	Morgo

La voce 2 (interventi vari in bacino di Lignano) comprende un "taglio" ubicato nell'area dei casoni della foce dello Stella, il probabile escavo della parte terminale del fiume Stella poco a monte della sua divergenza nel Verto Grande - Foce naturale.

La voce 6 (interventi vari in bacini di Grado) comprende l'escavo di un canale presso l'isola di Volpera e un piccolo intervento presso l'Isola Orbi.

Un discorso a parte è rappresentato dai dragaggi eseguiti nei canali tra il 1964 e il 2009, rispetto ai quali non si possiede alcuna informazione e che andrebbero anch'essi computati.

Una volta eliminati dal computo gli interventi antropici si ottiene un nuovo bilancio rappresentativo soltanto delle modificazioni "naturali", almeno per quanto è noto: erosioni, abbassamento del suolo per subsidenza, sedimentazione.

Nel grafico di Figura 4.40 e nella relativa tabella (Tabella 4.8) vengono riportate tutte le voci di bilancio: si evidenzia come il computo degli interventi, tutti di segno negativo ossia determinati da escavazioni, aumenti di fatto l'entità della deposizione all'interno dei canali. Mancando sicuramente altri interventi, soprattutto quelli relativi ai dragaggi di canali già esistenti, essa ne risulta comunque sottostimata.

Dal punto di vista quantitativo il sedimento che è andato a colmare i canali rappresenta però solo una parte del sedimento eroso, come si evince nel grafico di Figura 4.41 che rappresenta, per ogni bacino e per l'intera laguna, le percentuali di sedimento che rispetto alle quantità perse da velme, fondali, barene risulta essere sedimentato all'interno dei canali. A livello generale permane un disequilibrio generato da una movimentazione netta dei sedimenti rimaneggiati dalle velme in direzione dei canali e risulta irrimediabilmente perduta una consistente parte del materiale eroso dalle piane e dalle barene, a un tasso di 256295 mc all'anno. Tale deficit è per il 95% a carico dei bacini di Buso e Grado.

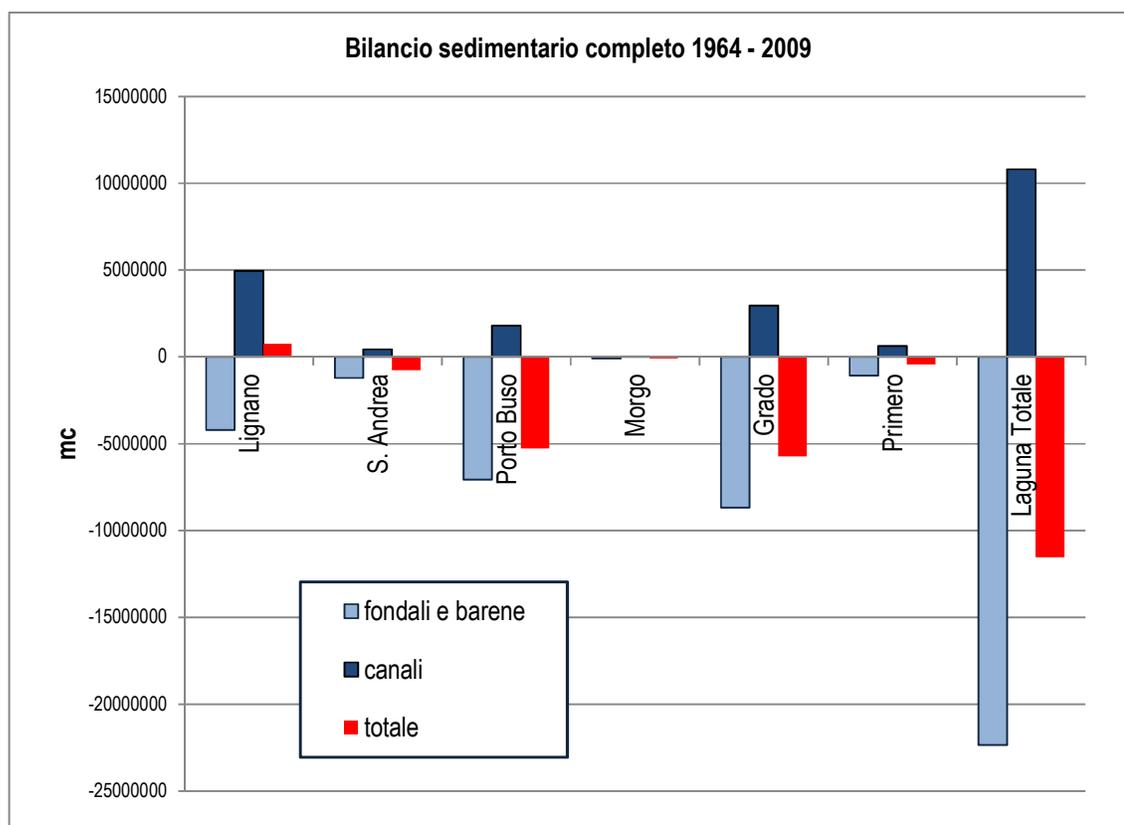
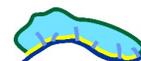


Figura 4.40. Bilancio sedimentario risultante dal confronto delle batimetrie 1964 e 2009, una volta esclusi dal computo gli interventi antropici.

Tabella 4.8. Bilancio sedimentario risultante dal confronto delle batimetrie 1964 e 2009.

Bilanci (1964-2009)	Intera laguna	Lignano	S. Andrea	Buso	Morgo	Grado	Primero
Fondali, velme, barene (mc)	-22346495	-4208102	-1208196	-7071751	-99533	-8682580	-1076333
Canali (mc)	7735763	3986744	441559	787767	24211	1863567	631915
Bilancio (mc)	-14610732	-221358	-766637	-6283985	-75322	-6819013	-444418
Tasso (mc/anno)	-324683	-4919	-17036	-139644	-1674	-151534	-9876
Interventi di escavo canali (mc)	-3077467	-966229	--	-1013822	-2583	-1094833	--
Bilancio corretto (mc)	-11533265	744871	-766637	-5270163	-72739	-5724180	-444418
Tasso corretto (mc/anno)	-256295	16553	-17036	-117115	-1616	-127204	-9876

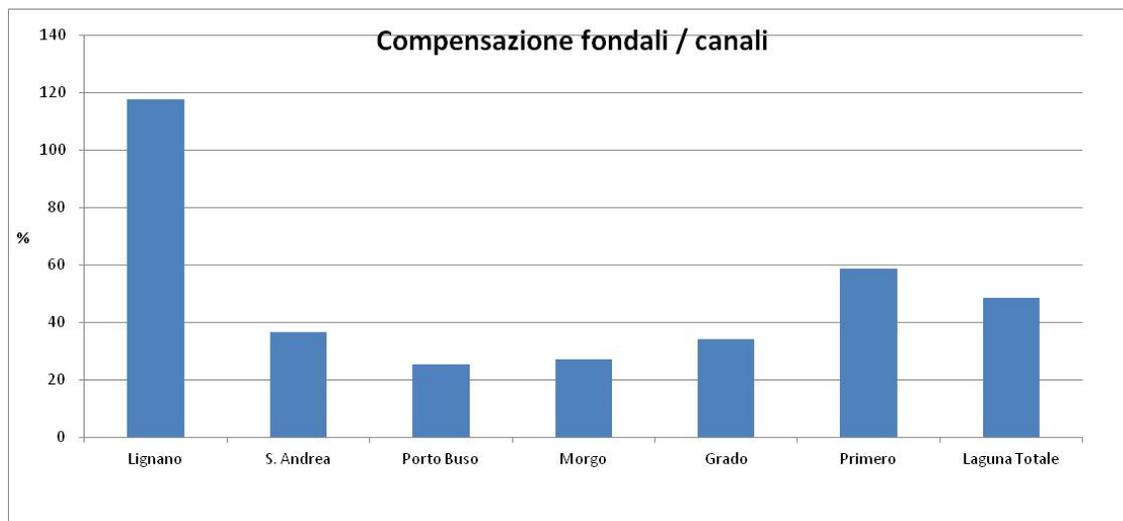
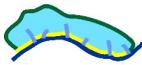


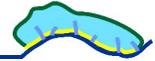
Figura 4.41 . Percentuale di sedimento che rispetto alle perdite di velme, fondali, barene risulta essere sedimentato all'interno dei canali.

Dal punto di vista gestionale questi dati assumono una certa rilevanza in quanto forniscono l'ordine di grandezza delle quantità di materiale sedimentario necessarie per il mantenimento dell'assetto morfologico della laguna. È evidente che il deficit generato nel passato è difficilmente recuperabile in termine di azioni di ripristino. Ma è altresì evidente che non è più accettabile che il materiale che deriva da operazioni di manutenzione non venga riutilizzato, se compatibile, ai fini del riequilibrio delle morfologie degradate.

Ad esempio questi risultati possono essere messi a confronto con le stime quantitative fornite dalla Regione relativamente alla necessità di dragaggio per il mantenimento dei canali navigabili. La regione fornisce i quantitativi iniziali per un primo lotto di dragaggi definiti "di messa a regime" per canali navigabili che avevano perso nel tempo la loro funzionalità. Successivamente a questi interventi (in alcuni casi già eseguiti in altri da eseguire entro il 2016) viene previsto un piano a cadenza triennale di "interventi manutentivi ordinari" per gli stessi canali. Sommando le stime quantitative per entrambe le tipologie si ottiene un quantitativo complessivo pari a 855400 mc. Buona parte di questi sedimenti viene indicata come "riutilizzabile ai fini del ripristino morfologico" per un totale di 848000 mc.

Per i dragaggi ordinari i quantitativi di sedimento riutilizzabile previsti ammontano a complessivi 267000 mc in tre anni. Il sistema laguna secondo le nostre stime e ipotizzando, forzatamente, una costanza del fenomeno durante gli anni subirebbe negli stessi tre anni una perdita pari a 768884 mc. Questa perdita dovrà essere attentamente valutata e analizzata nelle sue cause e nelle sue modalità in quanto può essere ascritta a vari fenomeni, solo alcuni dei quali possono essere in qualche maniera limitati attraverso interventi di adattamento morfologico.

Il riutilizzo del sedimento per la ricostruzione di velme e barene costituisce uno strumento valido, che consentirebbe di evitare un peggioramento del deficit del sistema lagunare rispetto all'alternativa di scarica a mare, che invece provocherebbe la perdita di un ulteriore 35% rispetto alle attuali perdite del sistema.



#### 4.4.2. Modello concettuale di bilancio sedimentario

Basandosi sull'assunto per cui il tasso di sedimentazione è il principale fattore di controllo dell'evoluzione lagunare, Nichols (1989) propose un modello di sviluppo per una laguna in condizioni trasgressive che prevede tre diverse possibilità in base alla relazione tra i tassi di accrezione lagunare e quelli di innalzamento del livello del mare: le lagune in deficit, in surplus e in equilibrio.

Una corretta definizione del bilancio sedimentario lagunare e quindi del suo "destino evolutivo" richiede però l'identificazione dei termini che contribuiscono a questo bilancio.

La definizione del bilancio sedimentario è in primo luogo strettamente connessa alle variazioni (natural e antropiche) del regime idrologico lagunare, che dipende dalla portata dei fiumi immissari e dei corsi d'acqua che gravitano sul comprensorio, dai flussi mareali e dall'assetto delle bocche lagunari e dagli interventi condotti dall'uomo sui fondali interni (dragaggi e/o imbonimenti).

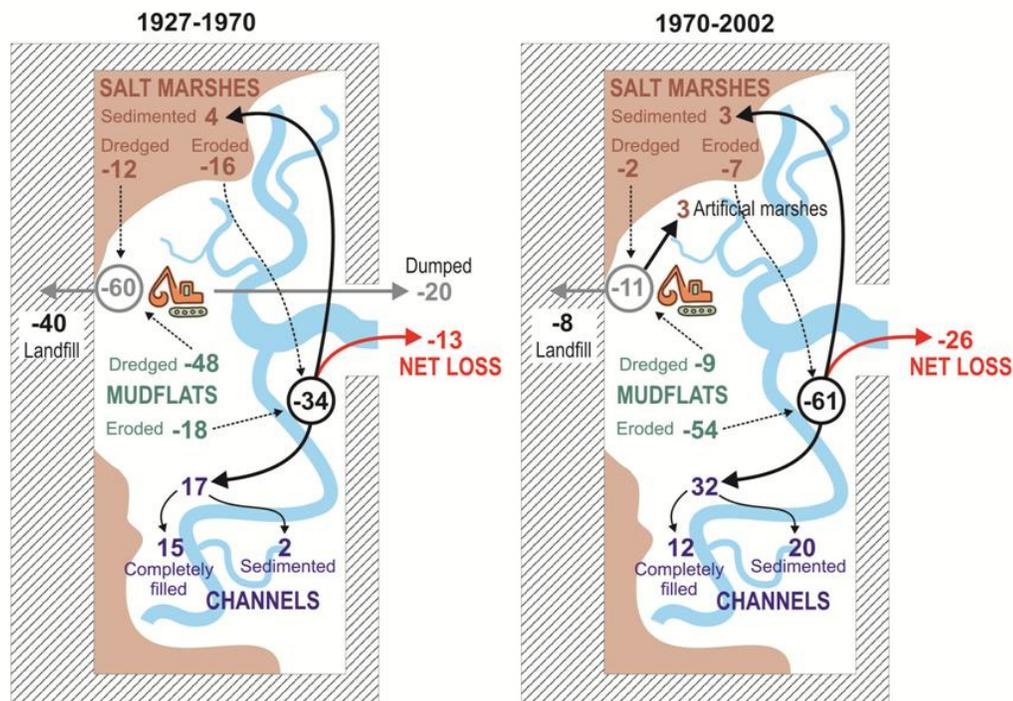
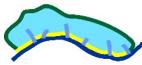


Figura 4.42. Esempio di modello concettuale di bilancio sedimentario realizzato per la laguna di Venezia (Sarretta et al. 2010), ricavato dal confronto delle batimetrie storiche. Il modello considera differenti elementi ottenibili da confronto morfologico e da alcuni dati di corredo (quantificazione degli interventi di dragaggio dei canali): erosione naturale e antropica delle velme (mudflats), erosione naturale e antropica delle barene (saltmarshes), interrimento dei canali (channels), sottrazione di sedimento con stoccaggio in casse di colmata (landfill) o dispersione in mare (dumping). Il bilancio complessivo per la laguna di Venezia ha dato come risultato una perdita di sedimento alle bocche pari a -13 milioni di mc per il periodo 1927-1970 e di 26 milioni di mc per il periodo 1970-2000.

Per quantificare gli input e gli output sedimentari e i trasferimenti di materiale interni al sistema lagunare bisognerebbe disporre di una gran mole di dati relativi all'apporto sedimentario da parte delle acque dolci entranti direttamente in laguna, al trasporto di sedimento alle bocche, alle entità delle movimentazioni di sedimento operate dall'uomo, alla risospensione indotta dalla pesca alle vongole o da altre attività umane. Elementi questi ultimi che possono determinare situazioni di profondo disequilibrio nel comprensorio lagunare.



Le informazioni fin qui raccolte riassunte nella Tabella 4.8 hanno permesso di estrapolare un modello di bilancio che non può in questa fase essere assunto come preciso, per le ragioni qui di seguito espresse e che si spera almeno in parte di poter implementare nel prosieguo.

#### *Subsidenza dell'area lagunare*

Le differenze *altimetriche* negative riscontrate nel periodo 1964-2009 non sono necessariamente tutte ascrivibili a processi erosivi.

La Bassa pianura friulana infatti è interessata dai fenomeni di subsidenza, così come tutto l'arco della pianura padana che si sviluppa dal Veneto all'Emilia - Romagna. L'intensità del fenomeno naturale in passato è stato aggravato dall'estrazione dei fluidi dal sottosuolo che negli ultimi decenni hanno accelerato i processi di costipamento dei terreni.

I valori di subsidenza regionale calcolati recentemente per i terreni circumlagunari sulla base di due sondaggi raccolti nel corso del Progetto FISR Vector (Antonoli et al., 2009) sono pari a 0,4 mm/anno. L'entità della subsidenza regionale (22 mm) è quindi trascurabile entro l'intervallo in esame. Non lo è invece localmente, soprattutto se si considerano i terreni olocenici.

Secondo i dati della Protezione Civile del FVG (2010), considerando il caso specifico delle Lagune di Marano e Grado, oltre ai processi naturali e antropici connessi con l'estrazione dell'acqua dal sottosuolo in corrispondenza degli abitati, non vanno sottovalutati i fenomeni di costipamento successivi alle bonifiche che hanno interessato tutto l'arco lagunare a monte dell'attuale argine di conterminazione.

Ciò ha comportato un abbassamento del suolo che può aver coinvolto nel tempo gli stessi argini negli anni successivi alla loro realizzazione e all'esecuzione delle opere di drenaggio per il recupero dei terreni ad uso agricolo. Tale abbassamento è stato favorito anche dalla presenza di livelli, talvolta consistenti, di torbe o di argille organiche, particolarmente diffusi in alcuni settori del perimetro lagunare tra le foci dei fiumi Natissa e Turgnano.

La sintesi riportata dalla Protezione Civile prosegue specificando che tutta la regione compresa tra la linea di livellazione che si sviluppa lungo la strada statale da Latisana a Ronchi a Nord e tra le foci del Tagliamento e dell'Isonzo a Sud, è caratterizzata da significativi fenomeni di "subsidenza" già accertati nel periodo 1980-1989 e confermati nel successivo intervallo temporale 1989-2004.

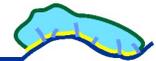
Più in particolare, va sottolineato che il processo di subsidenza, analizzata nell'intero periodo 1980-2007, interessa tutta l'area lagunare con particolare riferimento all'arco costiero (da 4 mm/anno a Lignano a 7 mm/anno a Grado), all'asta del Tagliamento da Latisana alla sua foce (attorno a 4 mm/anno), al delta dell'Isonzo (con punte fino a 5 mm/anno) e all'area che si sviluppa da Latisana fino a poco ad E di Muzzana. Nell'area lagunare in esame i valori, riferiti al periodo 1980-2007, variano quindi da 2 a 7 mm/anno.

La regione più orientale, che comprende l'area di Torviscosa, Cervignano, Ronchi, Monfalcone, Aquileia, e quella dove la subsidenza, pur presente, è più attenuata con valori pari a 1-2 mm/anno circa. È ovvio che in quest'ultima area hanno certamente influito le caratteristiche litologiche del sottosuolo legate ad una diminuzione dello spessore del materasso dei sedimenti sciolti (Quaternario), dovuti al sollevamento graduale del substrato, costituito dalla serie flyschoidale e carbonatica, quest'ultima affiorante poco più ad est.

Se i dati riportati dalla Protezione Civile, che hanno riguardato specificatamente la struttura arginale del comprensorio lagunare, fossero estrapolabili anche alle morfologie interne, l'entità degli sprofondamenti varierebbe da 11 a oltre 38 cm, andando grossomodo dal settore maranese a quello gradese.

Sarà cura del gruppo di lavoro svolgere a tale proposito alcune simulazioni, per verificare l'attendibilità di un modello che tenga conto della subsidenza differenziata arealmente, in modo da comprendere la reale evoluzione del territorio.

Rimane comunque assolutamente invariato il paradigma che accompagna l'analisi già presentata e cioè quello che l'annegamento della laguna, in mancanza di apporti solidi che lo compensino, produce una



semplificazione morfologica che si esplica nell'erosione complessiva delle piane di marea più esposte all'azione del vento e contestuale interrimento dei canali, che perdono via via la propria funzionalità.

#### *Escavazioni dei canali*

Per un'analisi più precisa dei termini di bilancio sedimentario sarebbe necessario poter disporre di un esatto censimento di tutte le attività di movimentazione dei sedimenti svolta per la manutenzione dei canali nell'intervallo temporale esaminato. I dati qui utilizzati sono solo parziali.

#### *Taratura con dati di bilancio alle bocche*

Non è stato ancora possibile utilizzare il dataset del monitoraggio alle bocche di porto mediante profilatori acustici, svolto dall'ex Autorità di Bacino nel 2010-11. I dati potrebbero essere molto utili per comprendere l'ammontare delle entrate e delle uscite in sospensione, soprattutto per una calibrazione del modello concettuale.

#### *Input sedimentari da parte degli immissari in laguna*

Si tratta di una voce del bilancio relativamente alla quale non ci sono dati a disposizione se non estremamente frammentari e di difficile reperibilità. Gli apporti di acque dolci in laguna derivano in prevalenza dai fiumi di risorgiva (Stella, Turgnano, Zellina, Aussa-Corno, Natissa, Tiel), dall'unico fiume proveniente dall'area montana (Cormor) e da 30 impianti idrovori distribuiti sul margine lagunare, che drenano le aree bonificate della bassa pianura friulana. Nel 2009 l'Autorità di Bacino Regionale del Friuli Venezia Giulia ha calcolato l'apporto medio dei fiumi in 81.5 m<sup>3</sup>/s, con il maggior contributo dato dallo Stella (36.1 m<sup>3</sup>/s) e dal Cormor (10.7 m<sup>3</sup>/s). Relativamente al trasporto solido i dati sono però di fatto inesistenti.

### **4.5. Gli elementi morfologici di interesse**

Per una corretta formulazione degli ambiti di protezione e delle priorità gestionali la complessa struttura geomorfologica della laguna richiede di essere descritta nei suoi diversi elementi, da un punto di vista sia qualitativo che quantitativo: è quindi necessario che siano descritte, quantificate e localizzate le principali morfologie esistenti e le loro tendenze evolutive.

Sono state individuate quali morfologie di particolare interesse geomorfologico e come substrato di habitat di rilevante interesse conservazionistico le seguenti:

- banchi
- isole barriera
- barene
- velme
- canali
- valli da pesca

Questa parte del lavoro ne affronta l'analisi dal punto di vista degli aspetti morfo-evolutivi: stato di fatto, stato di conservazione, stato conoscitivo (Figura 4.43). Nel capitolo 6 verranno invece affrontati gli aspetti gestionali.

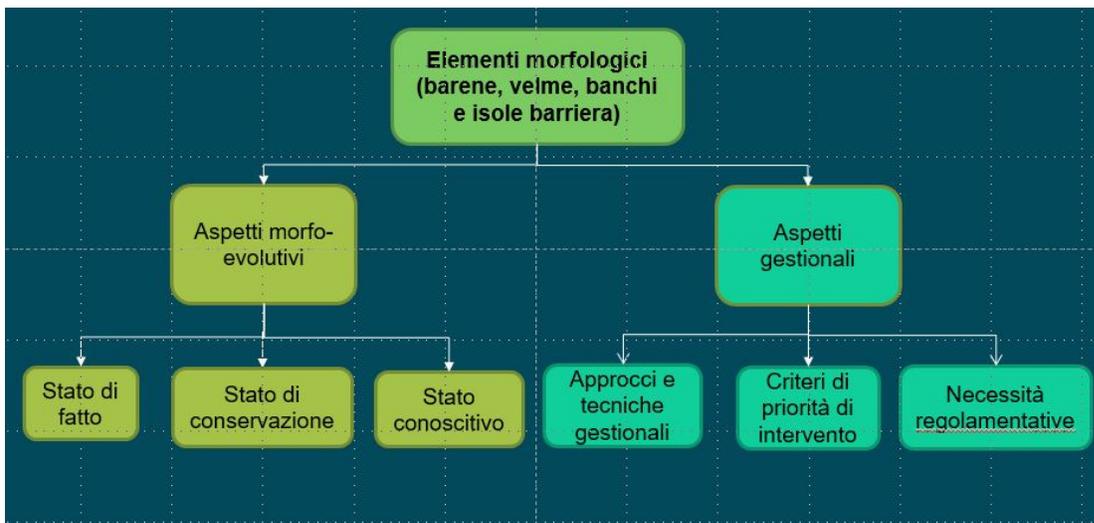


Figura 4.43. Schema logico della parte di analisi che riguarda gli elementi morfologici della laguna.

#### 4.6. Banchi e isole barriera

Nel caso della laguna di Marano e Grado il sistema di isole barriera che usualmente separa le lagune dal mare aperto assume una caratteristica del tutto peculiare (Figura 4.44).

Esso può essere infatti distinto in due parti con caratteristiche molto diverse. Nella parte occidentale della laguna, da Porto Buso alla bocca di Lignano, sono presenti le isole barriera di Martignano e Sant'Andrea separate tra loro dalla bocca di Sant'Andrea. La porzione centro-orientale, dalla bocca di Porto Buso a quella di Grado, è invece caratterizzata da un peculiare doppio sistema di isole-barriera, costituito verso terra da isole sabbiose parzialmente antropizzate o irrigidite da opere di difesa e, verso mare, da banchi sabbiosi a scarsa elevazione e in continua evoluzione.

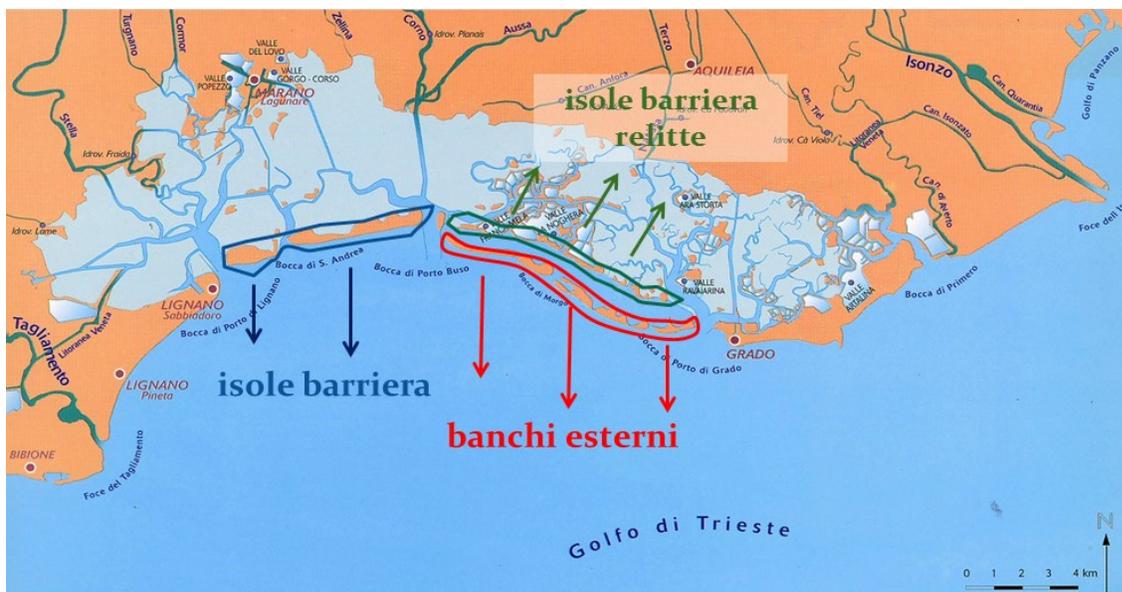
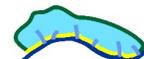


Figura 4.44. Sistema di isole barriera e banchi esterni della Laguna di Marano e Grado.



Si tratta in entrambi i casi di ambienti di spiaggia che in quanto tali sono sistemi aperti, caratterizzati da uno scambio rapido e continuo di sedimenti che avviene con i tratti di costa limitrofi e i fondali antistanti. Gli spostamenti della linea di riva associati alla progradazione o all'erosione della spiaggia e l'aumento o la diminuzione della superficie di spiaggia emersa sono tra i primi indicatori dello stato morfodinamico di un'area costiera pur non potendo essere considerati affidabili in senso assoluto. Essi sono la manifestazione morfologica più evidente dell'equilibrio dinamico fra le varie forzanti in gioco: il moto ondoso incidente sulla costa, le correnti longshore, l'eustatismo, l'input sedimentario.

#### 4.6.1. Dati e metodologia di analisi

L'analisi dell'evoluzione delle isole barriera e dei banchi esterni durante l'ultimo secolo ha riguardato l'evoluzione della linea di riva, dell'estensione delle superfici emerse e il riconoscimento qualitativo delle più frequenti tipologie morfodinamiche, elementi desumibili grazie alla disponibilità di cartografia storica, foto aeree e rilievi topografici descritti al paragrafo 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 e sintetizzati nella Tabella 4.9.

Tabella 4.9 – Linee di riva utilizzate per lo studio dell'evoluzione dei banchi e delle isole barriera.

anno	FONTE	BANCHI	ISOLE BARRIERA
1891/1894	IGM	X	-
1938	IGM	X	-
1954	FOTO AEREA	X	X
1978	FOTO AEREA	X	X
1990	FOTO AEREA	X	X
2002	RILIEVO GPS (Burla, 2003)	X	
2003	FOTO AEREE	X	X
2007	ORTOFOTO	X	X
2008	ORTOFOTO	X	X
2010	ORTOFOTO	-	X
2012	ORTOFOTO	X	X
2015	RILIEVO GPS QUESTO STUDIO	X	-

Per i banchi, vista la vivace dinamica costiera che induce modifiche molto consistenti anche sul breve periodo, al fine di avere dati il più possibile aggiornati è stata effettuata una campagna d'indagine ad hoc per questo lavoro nei giorni 10 e 11 giugno 2015.

La perimetrazione dei banchi è stata eseguita mediante un ricevitore GNSS S9III della Stonex, utilizzato in modalità differenziale. Una volta ricevute le coordinate in posizione del generico ricevitore (rover), queste sono corrette attraverso un indice di correzione differenziale calcolato dalla rete di stazioni permanenti del Friuli-Venezia Giulia. Questa tecnica permette di ridurre gli errori (ionosferici, troposferici, ecc.) associati al segnale GNSS raggiungendo, quindi, una precisione centimetrica del proprio posizionamento.

In particolare il rilievo topografico della linea di riva è stato effettuato attraverso l'utilizzo di due ricevitori GNSS: il primo in modalità cinematica continua per tracciare la linea di riva secondo l'evidenza morfologica in situ, il secondo per tracciare una serie di piccoli transetti perpendicolari alla linea di riva eseguiti con una spaziatura di circa 200 m o minore nei casi di elevata variabilità morfologica (Figura 4.45). Questi transetti costituiti da una serie di punti, dei quali è stata fatta determinazione della quota



esatta oltreché della loro posizione, sono stati utilizzati in fase di elaborazione per correggere e determinare con precisione l'esatta posizione della linea di riva.



Figura 4.45. Operazioni di rilevamento topografico dei banchi d'Anfora, d'Orio e dei Tratauri di giugno 2015.

#### *Analisi delle superfici emerse dei banchi*

Lo studio riguardante l'evoluzione nel tempo della superficie emersa dei banchi è stato realizzato in ambiente GIS attraverso la creazione di singoli *shapefile* (poligono) che rappresentano l'estensione superficiale dei banchi nei vari anni. Attraverso la sovrapposizione di questi poligoni con un grigliato composto di 50 celle aventi una larghezza ognuna di 200 m (Figura 4.46), è stata calcolata per ogni annata l'area racchiusa in ogni singola cella (Figura 4.47), analizzando successivamente le variazioni intercorse per ogni coppia di anni.

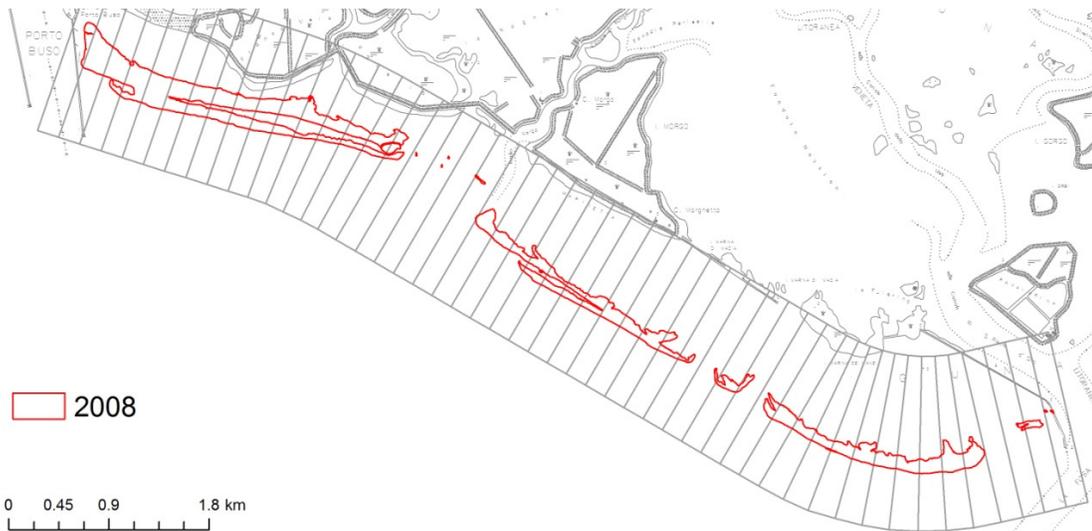
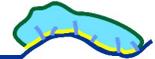


Figura 4.46. Griglia regolare di 50 celle utilizzata in ArcGis 10.3.1 e poligoni ricavati dalla digitalizzazione della linea di riva per un'annata a titolo di esempio.



Figura 4.47. Esempio di suddivisione dei poligoni in parti discrete secondo la maglia di 50 celle.

#### Analisi delle variazioni della linea di riva

La variazione della posizione delle linee di riva per coppie di anni è stata calcolata attraverso l'estensione software DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) di ArcGis, appositamente creata dall'U.S.G.S. (*United States Geological Survey*) (Thieler, 2009). Tale estensione crea una serie di transetti perpendicolari alle linee di riva, con spaziatura decisa dall'utente e permette di calcolare le variazioni (avanzamento/arretramento) della linea di riva lungo ciascun transetto. Tale variazione è stata calcolata per un totale di 185 transetti con una spaziatura di 50 metri per i banchi (Figura 4.48), di 128 transetti spazati di 20 m per Martignano (Figura 4.49) e di 103 transetti spazati di 50 m per Sant'Andrea (Figura 4.50).

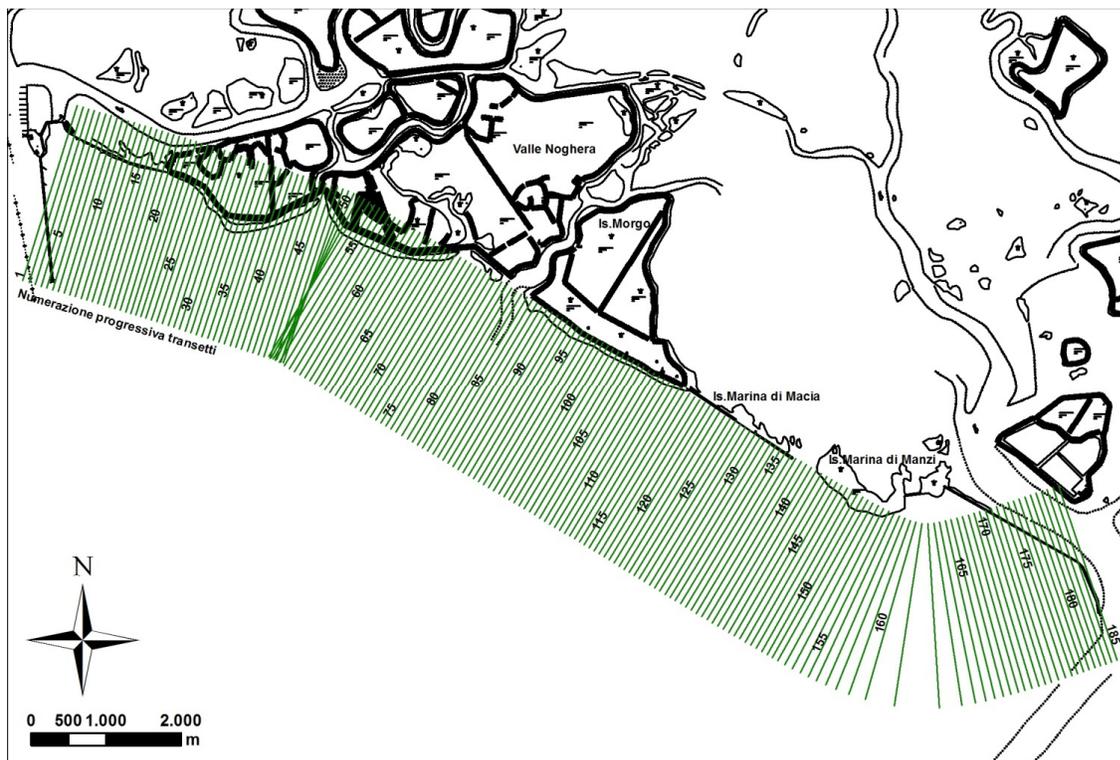
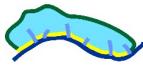


Figura 4.48. Localizzazione sui banchi dei transetti creati dall'estensione software DSAS per analizzare le variazioni subite dalla linea di riva nel tempo.

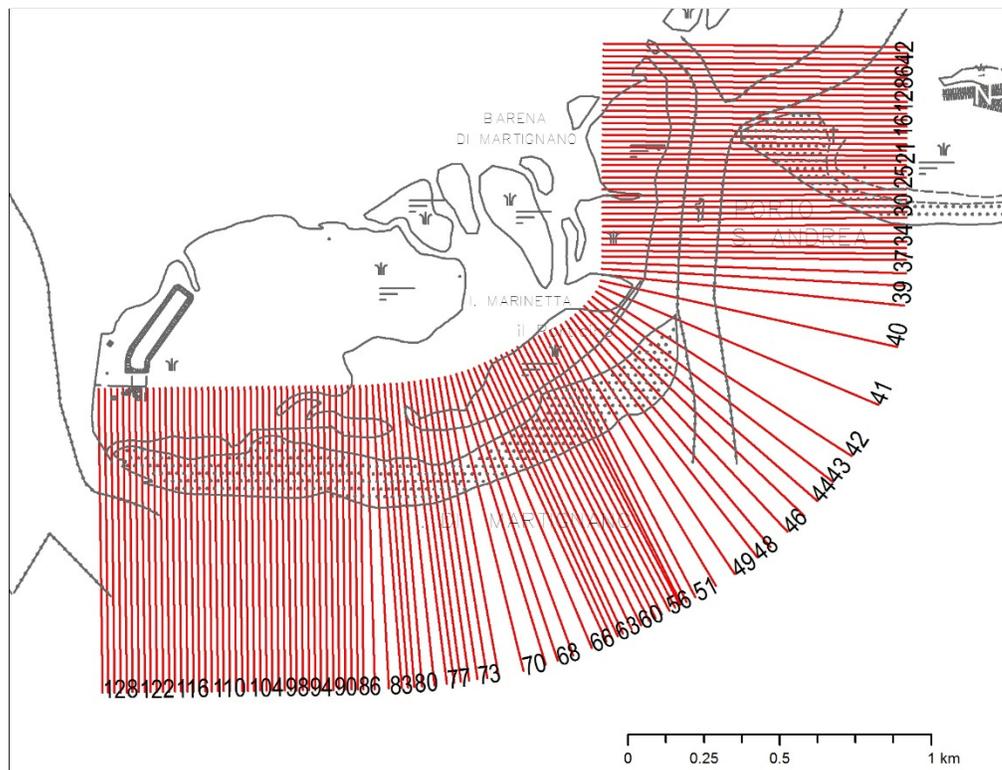


Figura 4.49. Localizzazione sull'isola di Martignano dei transetti creati dall'estensione software DSAS per analizzare le variazioni subite dalla linea di riva nel tempo.

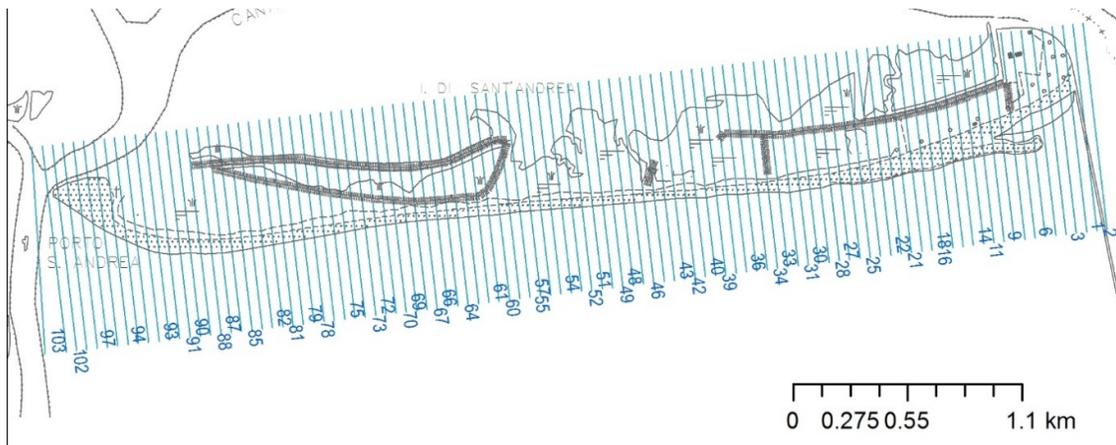
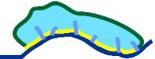


Figura 4.50. Localizzazione sull'isola di Sant'Andrea dei transetti creati dall'estensione software DSAS per analizzare le variazioni subite dalla linea di riva nel tempo.

L'elevato numero di transetti analizzato nel caso dei banchi e dell'isola di Martignano consente di compensare la presenza di accidenti morfologici legati ai frequenti cambi di orientazione delle linee di riva e alla sua elevata frammentazione soprattutto nel caso dei banchi. Una volta calcolata la variazione della linea di riva per ciascun transetto (esempio dei risultati che si ottengono in Figura 4.51) la media dei valori ricadenti all'interno di una cella è stata a essa assegnata, in modo da disporre di dati più facilmente confrontabili e riconoscibili dal punto di vista geografico.

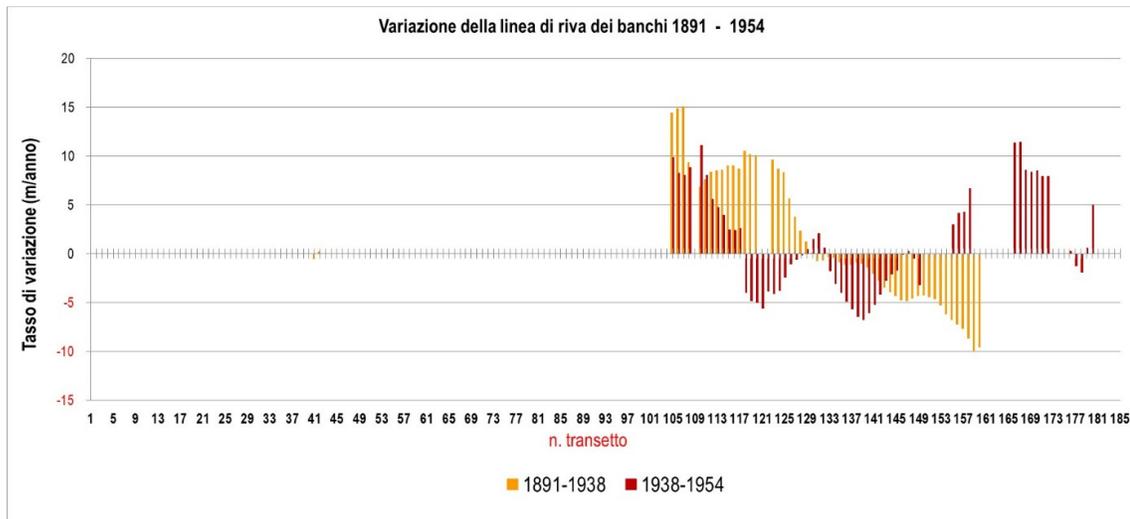
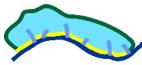


Figura 4.51. Esempio di risultato ottenuto dal calcolo della variazione della linea di riva per i banchi per ciascuna coppia di anni.

#### 4.6.2. Stato di fatto: distribuzione e morfologia recente

I banchi sabbiosi esterni si estendono per una lunghezza complessiva di 10 km dalla diga di San Pietro d'Orio, posta all'imboccatura del canale d'accesso all'isola di Grado, fino alla scogliera orientale di Porto Buso e racchiudono un piccolo bacino para-lagunare di circa 530 ha. Tradizionalmente si individuano tre banchi principali denominati da est verso ovest: Tratauri, Orio e Anfora.



La morfologia più recente può essere descritta grazie alle campagne di rilievo topo-batimetrico svolte nel mese di giugno (rilievo topografico della linea di riva) e di novembre 2015 (rilievo topobatimetrico lungo 11 transetti perpendicolari alla linea di riva dalla parte emersa della spiaggia fino alla batimetrica e grazie alla disponibilità di foto aeree di luglio 2015 (Figura 4.52), pubblicate online da Google Earth (<https://earth.google.com>). I suddetti rilievi e analisi sono stati svolti per una tesi di laurea sviluppata nell'ambito del presente Studio (Ulliani, 2015).

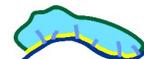
Allo stato di fatto di giugno / luglio 2015 il banco dei Tratauri nella sua porzione più orientale a ridosso della diga di San Pietro d'Orio è costituito da piccoli accumuli sabbiosi emersi, privi di vegetazione. Un varco ampio 240 m separa questi ultimi dal troncone principale del banco, maggiormente esteso e sviluppato (33.7 ha la parte emersa). Nel complesso il corpo assume una conformazione ad arco con orientazione NE-SW/SE-NW ed è separato dal banco d'Orio da un secondo varco, esteso circa 600 m.



Figura 4.52. I banchi sabbiosi della laguna di Grado nel 2015 (immagine da Google Earth, data acquisizione immagini: 12/07/2015): in evidenza la linea di riva dei banchi tracciata grazie ai rilievi GPS effettuati nel mese di giugno 2015.

A causa delle significative modificazioni di estensione e forme avvenute anche recentemente il banco principale è costituito da ampie aree a sabbia nuda o scarsamente vegetate. In alcuni tratti è possibile individuare piccoli accumuli sabbiosi di origine eolica (dune embrionali) seguiti verso terra da una duna semifissa (non consolidata) sulla quale si è insediata una vegetazione perenne di tipo psammofilo. Nel retrobarriera sono presenti solo in alcune porzioni aree a barena dalla morfologia piatta e coperte da vegetazione tipicamente alofita. In base alla campagna topo batimetrica svolta a novembre 2015 la quota massima del banco risulta compresa tra 1.33 e 2 m sul livello medio mare (datum verticale = zero IGM 1942, Genova), mentre l'ampiezza della porzione emersa è compresa tra 82 e 154 m. Per quel che riguarda la spiaggia sottomarina i rilievi evidenziano le tipiche strutture a barre e truogoli, in particolare nella porzione occidentale del banco si evidenzia la presenza di una barra intertidale che si sviluppa parallelamente alla linea di riva anche se con andamento sinusoidale e la cui cresta si trova a profondità compresa tra -0.76 m e -0.85 m, a una distanza compresa tra 80m e 100m circa dalla linea di riva. Man mano che si procede verso est la morfologia delle barre diviene più articolata con presenza di più creste, per il cambio di orientazione del banco e la vicinanza del canale della bocca tidale di Grado.

Il varco che attualmente separa il banco dei Tratauri dal banco d'Orio mostra una struttura molto articolata dal punto di vista geomorfologico, quale risultato di una recente rapida evoluzione, a partire dal 2012.



Due piccoli accumuli sabbiosi emersi che ricoprono una superficie totale di circa 2.03 ha sono presenti in una posizione arretrata rispetto ai banchi principali e sono il risultato dei processi di rottura e arretramento (“washover”) che hanno tipicamente interessato la porzione orientale del banco d’Orio, durante le mareggiate invernali. In corrispondenza della linea di riva e sulla piana di marea antistante la porzione emersa degli isolotti sono evidenti estesi livelli sabbiosi resi parzialmente coesi dalla presenza di materiale fine e da un reticolo di radici tipici di un ambiente di retro-barriera (barena). È quanto rimane della porzione di retro-barriera del banco d’Orio che tra il 2002 e il 2008 si trovava in posizione molto più avanzata verso mare.

Il banco d’Orio si estende per circa 2.3 km secondo l’orientazione SE-NW e ricopre una superficie totale di 24.6 ha; la porzione occidentale del banco è caratterizzata attualmente dall’avanzamento di una freccia litorale (spit) che fa migrare progressivamente la bocca tidale di Morgo verso ovest (Figura 4.53). Infatti, la bocca evidenzia uno spostamento verso nord-ovest pari a 350 m circa rispetto alla posizione assunta nel 2008. Il varco ha uno sviluppo complessivo in ampiezza di 450 m, ma il canale tidale attualmente attivo e adiacente all’estremità occidentale dello spit è ampio poco meno di 100 m.



Figura 4.53. Migrazione della bocca tidale di Mergo determinata dalla progradazione di uno spit verso NO. Si evidenzia in giallo la posizione assunta dalla bocca tidale nel 2008 mentre in verde la posizione attuale.

Solo la porzione centrale del banco è caratterizzata dalla presenza di una copertura vegetale continua e stabilizzata, anche se per la maggior parte di neoformazione. Sia l’estremità orientale che quella occidentale del banco presentano un ambiente di neoformazione quasi privo di vegetazione, limitata all’associazione vegetazionale *Salsola kali*-*Cakiletum maritimae*.

I profili topografici del 2015 mostrano una quota massima del banco pari a 1.53 m e 1.66 m rispettivamente, con un’ampiezza della porzione emersa di 110 e 72m. All’estremità ovest si evidenzia la presenza di una barra intertidale che procedendo verso est tende a rinsaldarsi al banco emerso nella porzione centrale. Una barra sommersa è presente più al largo, parallela alla linea di riva.

A ovest, il banco d’Anfora si estende per una lunghezza complessiva di circa 3 km con una superficie totale emersa pari a 74.8 ha. Il banco è separato dalla scogliera occidentale di Porto Buso da un piccolo canale naturale ampio 35 m circa che si mantiene grazie alla corrente di flusso/riflusso della marea. Il banco d’Anfora presenta una maggiore ampiezza rispetto ai casi precedenti (tra 230 e 440 m), raggiunge



quote massime di 1.9 m e ha una successione vegetazionale più completa, già evidenziata da Poldini (2006).

La porzione occidentale del banco mostra la progressiva crescita di due piccoli spit che si sviluppano in direzione SE-NW. La tendenza all'accrescimento è favorita dalla presenza della scogliera orientale di Porto Buso che intercetta il sedimento proveniente da est grazie alle correnti dominanti, intrappolandolo. Il tratto centrale del banco d'Anfora è caratterizzato da una zona di rottura recente abbastanza marcata che mette in comunicazione la depressione sommersa preesistente, interna al banco, con il mare aperto. Dalle foto aeree a disposizione e dai rilievi sono individuabili due modestissime barre intertidali e una barra sommersa, situata a 400 m circa dalla linea di riva, che raggiunge la batimetrica dei -1.20 m.

#### *Isole barriera di Martignano e Sant'Andrea*

Le isole barriera di Martignano e Sant'Andrea sono comprese rispettivamente tra la bocca di Lignano e quella di Sant'Andrea e tra quest'ultima e quella di Porto Buso. Si tratta di due morfologie che si sono evolute in maniera diversa nel corso del tempo e che hanno subito profonde modificazioni a opera dell'uomo.

La morfologia più recente viene di seguito descritta grazie ai sopralluoghi eseguiti nella primavera / estate 2015, alle ortofoto AGEA 2014 (Figura 4.54) e alle foto aeree di luglio 2015 pubblicate online da Google Earth (<https://earth.google.com>).

Attualmente l'isola di Martignano, nota anche come Marinetta, ha un'estensione complessiva pari a 108 ha (dato ottenuto dalla foto aerea del 2014). Essi sono solo in parte (circa 23 ha) costituiti da un'isola propriamente detta, che è però quasi interamente antropizzata in seguito a un imbonimento e alla costruzione di un impianto per la molluschicoltura e le relative strutture di servizio. Il resto delle superfici emerse è costituito da un prezioso mosaico di differenti elementi geomorfologici e relativi habitat: barene, morfologie relitte di cordoni litoranei sabbiosi, duna e spiaggia, inframezzate a velme e canali.

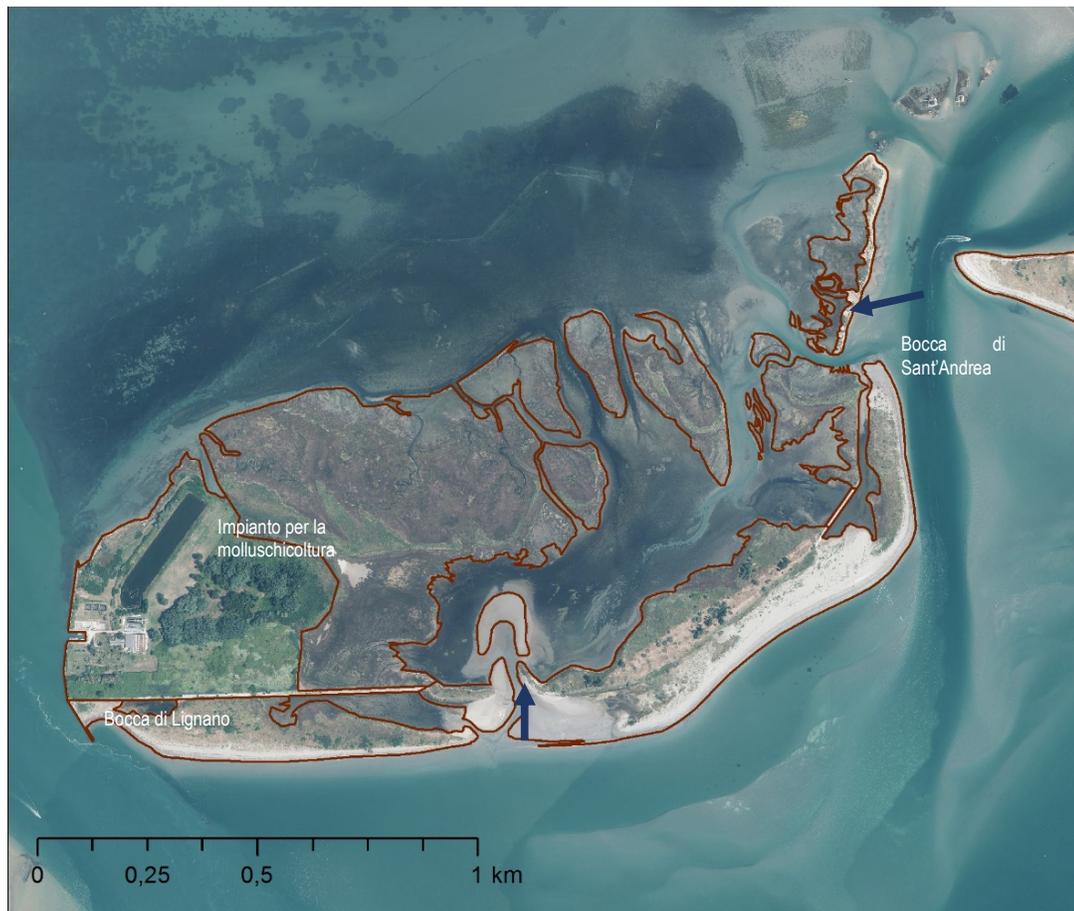
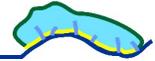
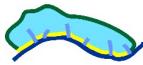


Figura 4.54. Ortofoto 2014 dell'isola di Martignano con la linea di riva digitalizzata (AGEA 2014), le frecce indicano i varchi che interrompono la continuità della spiaggia.

La spiaggia attuale ha un'estensione di circa 3 km, con orientazione variabile: il primo tratto prossimo alla bocca di Lignano (per circa 1300m) presenta un'orientazione ovest – est, procedendo verso est la linea di riva tende a curvare verso nord fino ad assumere (in prossimità della bocca di Sant'Andrea) una conformazione nord – sud che mantiene per circa 900m. Per quel che riguarda le opere di difesa costiera su buona parte dell'isola è presente, alle spalle dell'attuale spiaggia, un argine di protezione misto in terra e massi costruito a partire dal 1985. Esso si raccorda all'estremità ovest a un molo in massi a limitare per un breve tratto il canale di Lignano.

Nella foto del 2014 (Figura 4.54) la continuità della linea di riva appare interrotta da due varchi naturali. Il primo, nella porzione meridionale, è di recente formazione in seguito a una rotta (washover) e si trova in corrispondenza del varco che posteriormente suddivide l'argine in due tronconi. Il processo erosivo è evidente: la linea di riva mostra significativi arretramenti e sul litorale prospiciente a ovest la duna è stata in parte erosa.

Il secondo varco è costituito da un canale di marea che afferisce all'area di retro-barriera, è presente dal 2003 e si trova di fronte allo spit dell'isola di Sant'Andrea sul lato opposto del canale della bocca omonima. Per quel che riguarda i fondali antistanti è evidente dalla foto aerea la presenza di banchi di poco sommersi che si delineano con andamento arcuato parallelo alla linea di riva; essi sono condizionati nella loro disposizione dalla presenza a est della bocca tidale di Sant'Andrea, il cui canale assume un andamento nord-est / sud-ovest nella parte a mare. Nel contempo l'interazione tra il riflusso di marea e il moto ondoso prevalente determina la formazione di un delta sabbioso sommerso (noto in letteratura come "ebb delta").



L'isola di Sant'Andrea ha attualmente un'estensione complessiva di 211 ha (Figura 4.55), ha una morfologia allungata in senso est - ovest con un'ampiezza massima pari a circa 900 m. È costituita da vaste aree antropizzate destinate all'uso agricolo, di vallicoltura, parzialmente insediativo e in parte abbandonate. La spiaggia si estende per 5.4 km, quasi interamente allo stato naturale, fatta eccezione di una difesa radente in calcestruzzo nella porzione centrale dell'isola per una lunghezza di 200 m compresa tra due pennelli alle estremità. All'estremità orientale dell'isola si trova il lungo molo guardiano della bocca di Porto Buso. La spiaggia si presenta sempre sottile, fatta eccezione dell'estremità orientale dove è presente una serie di estesi banchi sabbiosi di poco emersi. La duna è poco sviluppata anche a causa dell'orientazione della spiaggia che rende il vento dominante (Bora) poco efficace per il trasporto eolico: si presenta poco estesa con morfologie eoliche raramente evidenti e quote in genere al di sotto dei 3 m.



Figura 4.55. Ortofoto più recente dell'isola di Sant'Andrea con la linea di riva digitalizzata (AGEA 2014).

#### 4.6.3. Banchi: stato di conservazione

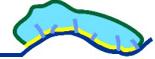
Dal punto di vista geomorfologico le isole barriera sono per natura ambienti altamente dinamici: modificazioni anche vistose e repentine della posizione della linea di riva e delle morfologie di spiaggia possono intervenire a scala stagionale e pluri-annuale e vanno ritenute come del tutto intrinseche alla naturale variabilità del sistema. Vi sono però alcune forzanti quali l'innalzamento del livello del mare e le modifiche degli apporti sedimentari (siano esse naturali o indotte dall'uomo), che possono influenzare le variazioni a lungo termine del sistema costiero indirizzandolo verso un'evoluzione che può metterne a rischio la conservazione.

È pertanto importante analizzare l'evoluzione delle morfologie e in particolare della linea di riva andando indietro nel tempo per individuare sia le variabilità a breve che quelle a più lungo termine e cercare di ipotizzare le tendenze future.

Per i banchi sabbiosi esterni che rappresentano una tipologia di isole barriera maggiormente soggetta alla dinamicità dei processi costieri definire uno stato di conservazione appare alquanto complesso. In questa sede si è deciso di utilizzare quali indicatori geomorfologici l'estensione delle superfici emerse e la posizione della linea di riva, entrambe desumibili dai diversi set di foto aeree a disposizione.

Le analisi eseguite hanno permesso di ricostruire la storia evolutiva dei banchi dal 1891 al 2015 mettendone in evidenza l'elevata dinamicità e che ha come risultato modificazioni rapide e continue della loro estensione, struttura morfologica e posizione.

*Variazione della superficie emersa dei banchi e analisi della linea di riva prima fase (1891/1894 – 1954)*



Nel 1891/1894 i banchi apparivano solo parzialmente sviluppati e solo nella zona davanti alle antiche isole della laguna di Grado note come Marina di Manzi, Marina di Macia e Isola Morgo (Figura 4.56), in questo tratto costiero erano presenti ben 9 bocche.

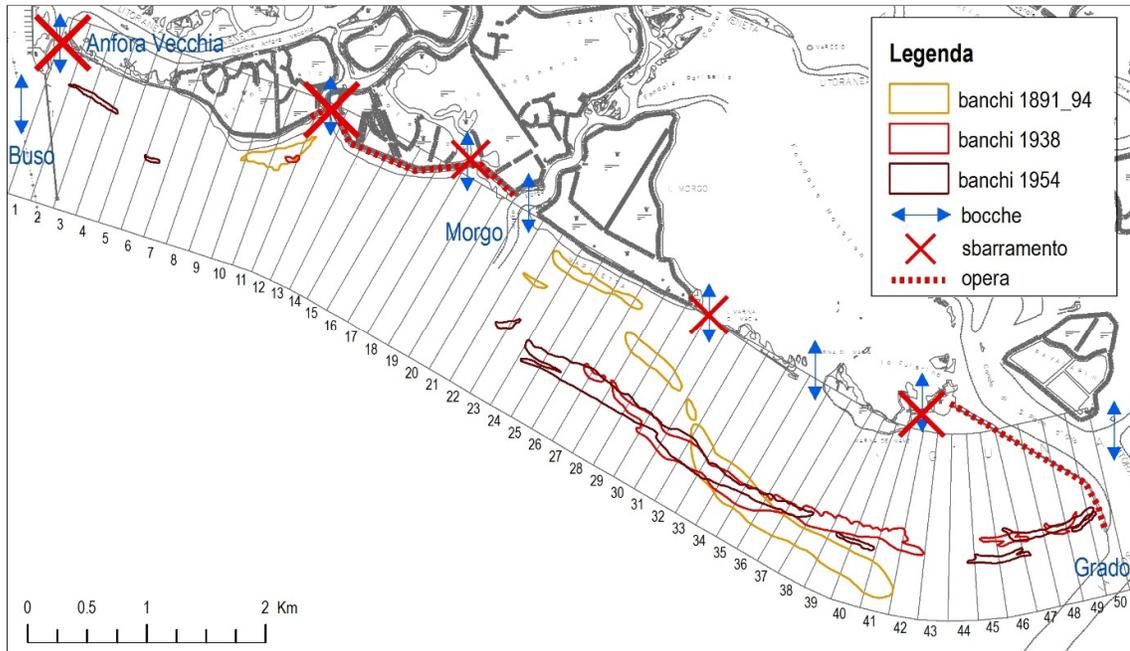


Figura 4.56. Evoluzione dei banchi tra il 1891/94 e il 1954.

Nel 1938 la conformazione dei banchi si era molto modificata rispetto a quella iniziale: il banco a ridosso dell'isola Franca Mela non era più cartografato e i banchi a est mostravano un notevole aumento in estensione con una conformazione più continua e allungata. In questo primo intervallo temporale sono da segnalare alcuni interventi antropici: gli sbarramenti delle bocche di Franca Mela e d'Anfora e la costruzione delle scogliere a difesa del canale d'accesso al porto di Grado, terminate attorno al 1934 (Brambati, 1987). Quest'ultima opera in particolare ha avuto influenza sul trasporto lungo riva (longshore) dei sedimenti, innescando la formazione di due piccoli accumuli sabbiosi emersi nelle strette vicinanze della diga di San Pietro d'Orio.

Nel 1954 il banco dei Tratauri si presenta più frammentato rispetto al 1938 ma maggiormente esteso verso nord - ovest.

Attraverso il grafico riportato in Figura 4.57 è possibile quantificare le variazioni areali che i banchi hanno evidenziato tra il 1891/1894 e il 1954, mentre nel grafico (Figura 4.58) vengono mostrate le variazioni della posizione della linea di riva.

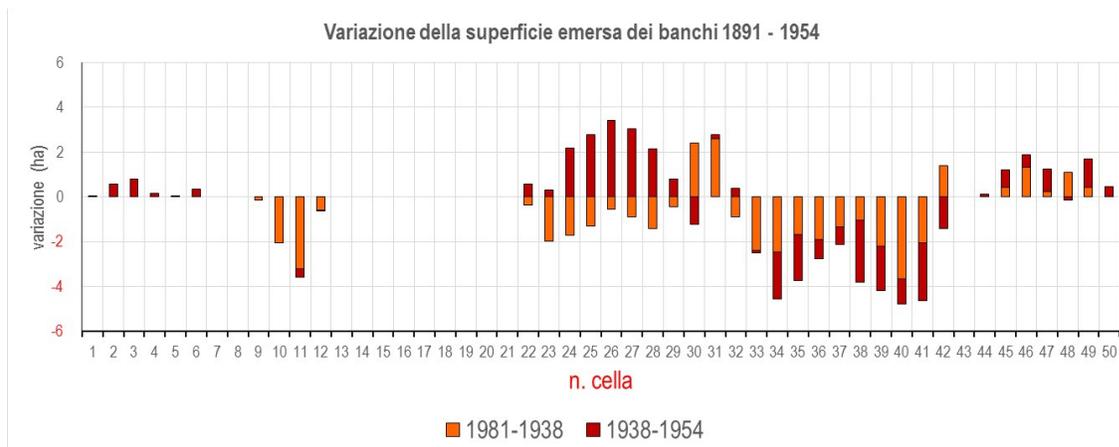
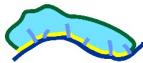


Figura 4.57. Variazioni della superficie emersa negli intervalli temporali 1891/1894 -1938 e 1938 - 1954.

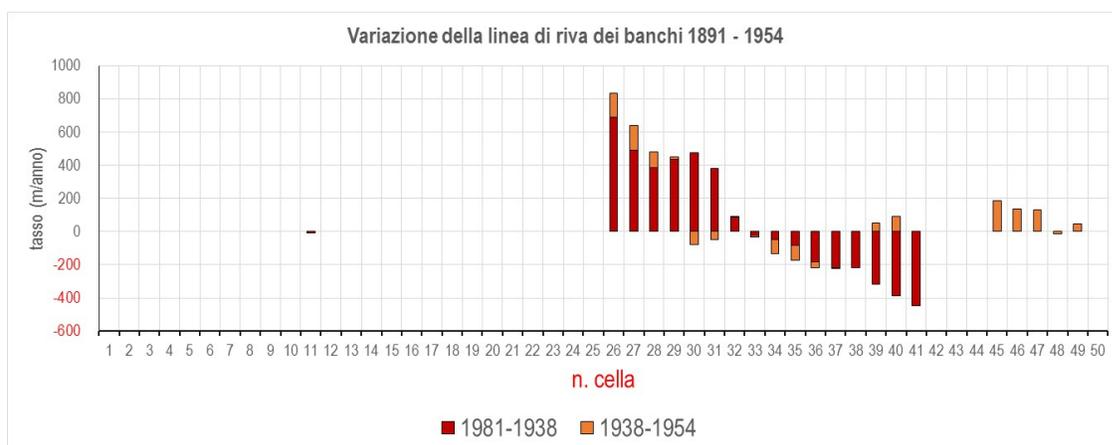


Figura 4.58. Variazione della posizione della linea di riva dei banchi negli intervalli temporali 1891/1894 -1938 e 1938 - 1954.

I grafici evidenziano modificazioni significative ma non sincroni su tutto il tratto di costa interessato con una parziale differenziazione geografica con uno stile evolutivo a “celle”. Le variazioni così elevate per la linea di riva non sono imputabili a vere e proprie migrazioni progressive della stessa soprattutto per il primo intervallo di tempo, bensì a modificazioni sostanziali avvenute lungo un arco di tempo esteso con effetti di fasi distruttive e, successivamente alla costruzione del molo di San Pietro d’Orio, l’impostazione di un diverso assetto morfodinamico. Si tratta inoltre di dati ricavati da una cartografia necessariamente imprecisa.

#### Variazione superficiale dei banchi e analisi della linea di riva tra il 1954 e il 1990

Confrontando tra loro le perimetrazioni dei banchi del 1954 e quelle del 1978 sono stati ricavati la mappa di Figura 4.59 e i dati rappresentati nelle Figura 4.60 e Figura 4.61.

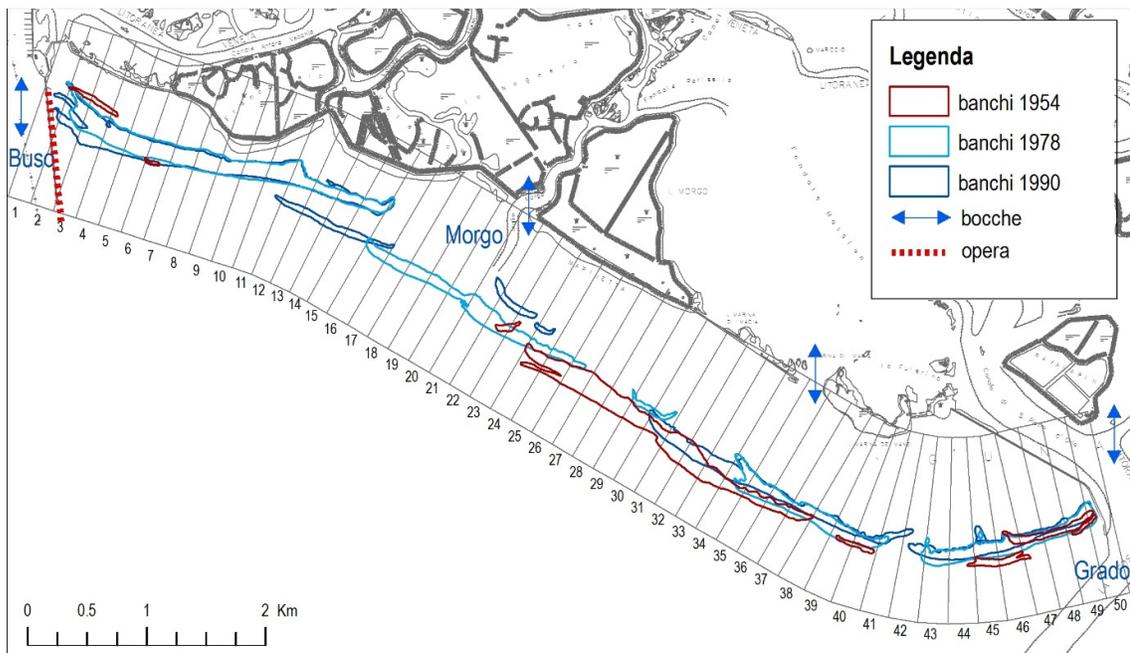


Figura 4.59. Evoluzione dei banchi tra il 1954 e il 1990.

- Parte occidentale: formazione e consolidamento del banco d'Anfora con uno sviluppo piuttosto deciso durante il primo intervallo temporale occupando le celle dalla n. 1 alla n. 15. Il banco mostra un'orientazione simile a quella del banco d'Orio, ma occupa una zona molto più vicina alla laguna retrostante. Questo rapido accrescimento potrebbe essere almeno in parte attribuito alla realizzazione delle scogliere di Porto Buso che furono costruite tra gli anni 1964 e 1968 (Brambati, 1987) e alla loro interferenza sul trasporto lungo riva dei sedimenti, intrappolando quelli provenienti da est. Tra gli anni 1978 e 1990 il banco mostra un consolidamento con un aumento di superficie per la zona compresa tra la cella n. 1 e n. 6, con la formazione di piccoli spit.
- Parte centrale: una fase di elevate e alterne variazioni interessa il tratto compreso tra la cella 16 e la cella 39 dove si assiste a momenti di quasi completa demolizione o frammentazione della parte emersa seguita da ricostruzioni e / o prolungamenti degli spit verso ovest. Nella foto del 1990 tutta il tratto tra la cella 16 e la 30 appare quasi privo di aree emerse mentre sono ben visibili ventagli di washover di poco sommersi. Entrambi gli intervalli temporali sono troppo elevati per comprendere meglio le dinamiche di demolizione / ricostruzione dei banchi in questo periodo.
- Parte orientale: consolidamento del banco dei Tratauri in un unico banco emerso, originatosi dall'unione dei tre tronconi che lo formavano nel 1954 e alla loro successiva evoluzione, il banco si presenta continuo fino al 1990 e subisce un allungamento verso ovest accompagnato da un assottigliamento (aretramento della linea di riva).

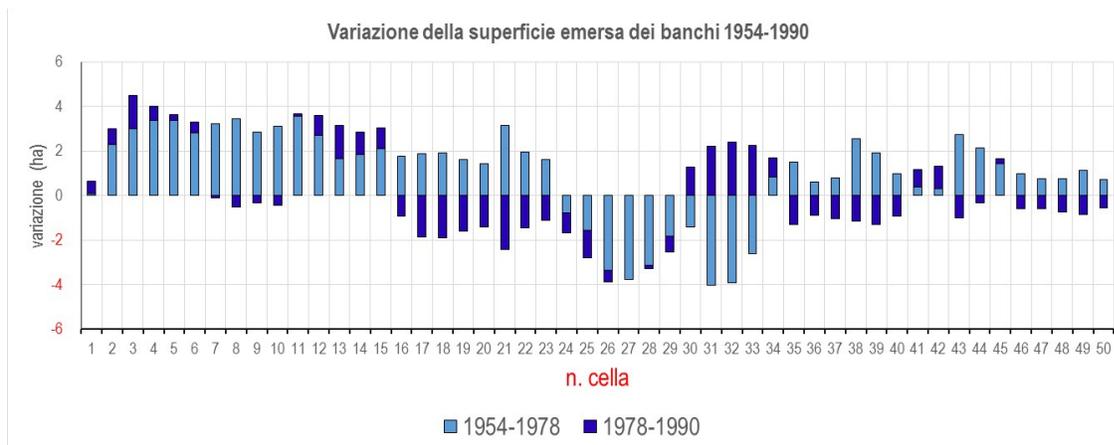
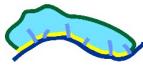


Figura 4.60. Variazioni della superficie emersa negli intervalli temporali 1954 -1978 e 1978 - 1990.

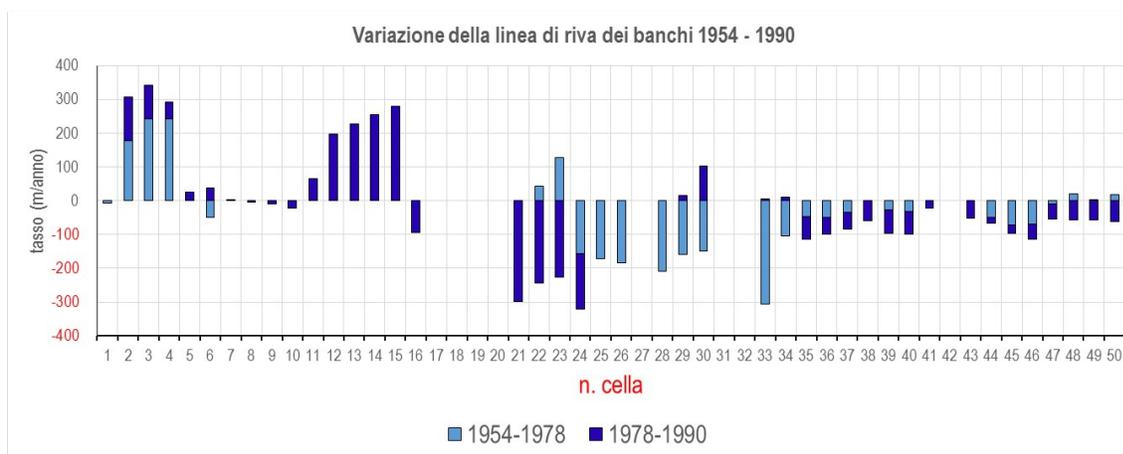


Figura 4.61. Variazione della posizione della linea di riva dei banchi negli intervalli temporali il 1954 ed il 1978.

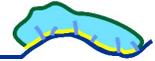
#### Variazione superficiale dei banchi e analisi della linea di riva tra il 1990 e il 2003

Confrontando tra loro le perimetrazioni dei banchi del 1990 con quelle del 2002 e del 2003 sono stati ricavati la mappa di Figura 4.62 e i dati rappresentati nella Figura 4.63 e Figura 4.64.

I dati indicano le seguenti modifiche:

- Parte occidentale: aumento di superficie molto marcato del banco d'Anfora, soprattutto per quanto riguarda le celle n. 7, 8 e 9 con un incremento di 2.37, 2.80 e 2.54 ha rispettivamente per l'intervallo di tempo 1990 - 2002, questo aumento è il risultato del rinsaldamento di una barra sabbiosa molto estesa alla parte orientale del vecchio banco che procedendo verso est rimane staccata racchiudendo così una piccola depressione sommersa all'interno del banco stesso. Il grafico riportato in Figura 4.64 evidenzia per il secondo intervallo temporale un avanzamento della linea di riva relativo alla porzione occidentale del banco d'Anfora con un tasso medio pari a 8.15 m/anno; viceversa, la parte orientale compresa tra i transetti n.8 e 17 attesta un arretramento abbastanza marcato con il valore massimo di -18.64 m/anno.

- Parte centrale: il banco d'Orio nel 2002 è costituito da un unico banco emerso, molto più sottile di quello presente nel 1990, e si estende dalla cella n. 21 fino alla cella n. 39. Dalla cella n. 21 alla cella n. 29 si attesta un aumento superficiale netto causato dal protendimento di uno spit e dalla sua successiva evoluzione.



- Parte orientale: si assiste a una frammentazione del banco dei Tratauri in due tronconi con una perdita di superficie emersa abbastanza rilevante e arretramento della linea di riva all'estremità orientale (dalla cella 45 alla cella 50), mentre in quella occidentale è presente un vistoso prolungamento in corrispondenza di una porzione del banco d'Orio presente nel 1990 e ormai erosa (celle 40 e 41).

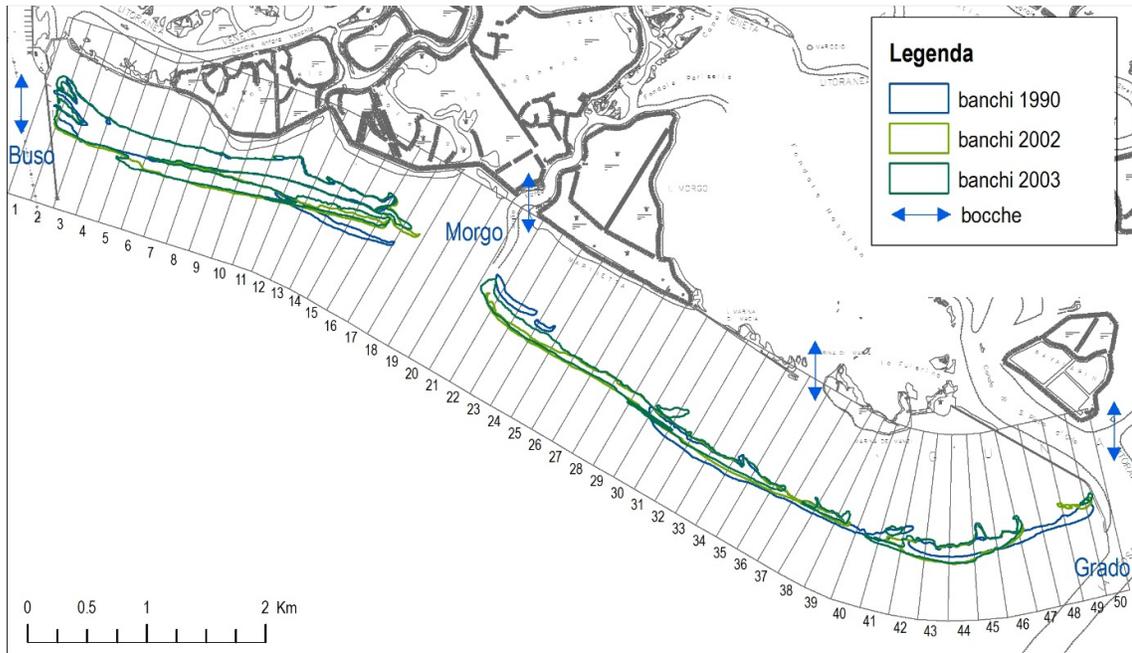


Figura 4.62. Evoluzione dei banchi tra il 1990 e il 2003.

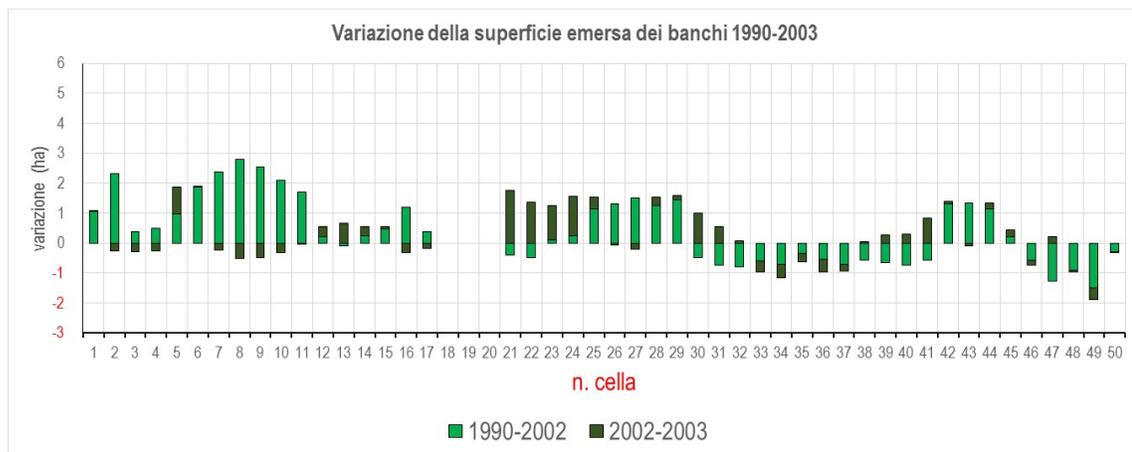


Figura 4.63. Variazioni della superficie emersa negli intervalli temporali 1990 - 2002 e 2002 - 2003.

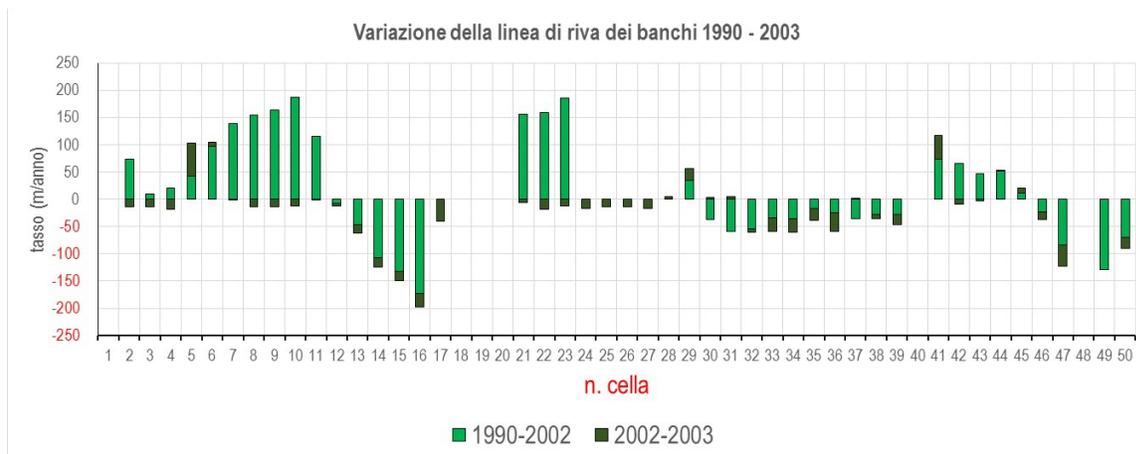
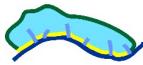


Figura 4.64. Variazione della posizione della linea di riva dei banchi negli intervalli temporali 1990 - 2002 e 2002 - 2003.

Da notare che le variazioni della linea di riva per il secondo intervallo temporale ( 2002-2003) mostrano un trend generalmente negativo che riguarda l'intero tratto di costa (tasso medio di -4.11 m/anno) con le uniche eccezioni rappresentate dalle celle 5 e 6, 29 e 41. Si tratta di aree interessate dalla progradazione di singoli spit che si accrescono secondo la stessa direzione del trasporto longshore.

#### *Variazione superficiale dei banchi e analisi della linea di riva tra il 2003 e il 2008*

Le modificazioni avvenute sui banchi riferite alle annate 2003, 2007 e 2008 sono mostrate nella mappa di Figura 4.65 e nei grafici di Figura 4.66 e di Figura 4.67.

I risultati indicano le seguenti modifiche:

- Il banco d'Anfora mantiene e consolida la propria morfologia seppur con un piccolo arretramento della lingua sabbiosa che racchiudeva la depressione sommersa situata all'interno del banco, formatasi nel precedente lasso temporale. La cella n. 5, caratterizzata dalla formazione di un piccolo spit, evidenzia un aumento superficiale di 0.92 ha.

Prendendo in considerazione un intervallo temporale di soli due anni, i banchi raffigurati nella Tav.6 non evidenziano modificazioni morfologiche significative, se non in precisi tratti di litorale.

Partendo da est, il banco dei Tratauri ha conservato la propria morfologia: gli accumuli sabbiosi localizzati a ridosso della scogliera Ovest di Grado si sono nuovamente ridimensionati mentre il troncone occidentale, maggiormente esteso, si è sviluppato ancora, raggiungendo la cella n. 40. Il banco d'Orio invece, si è spezzato in due tronconi: il primo, a Est, occupa le celle n. 37, 38 e 39 mentre quello più esteso, ad Ovest, ha raggiunto la cella n. 21, in prossimità della bocca tidale di Morgo. Tale sviluppo ha determinato un aumento superficiale all'interno delle celle n. 21, 22, 23 e 24 di 1.77, 1.35, 1.16 e 1.34 ha rispettivamente.

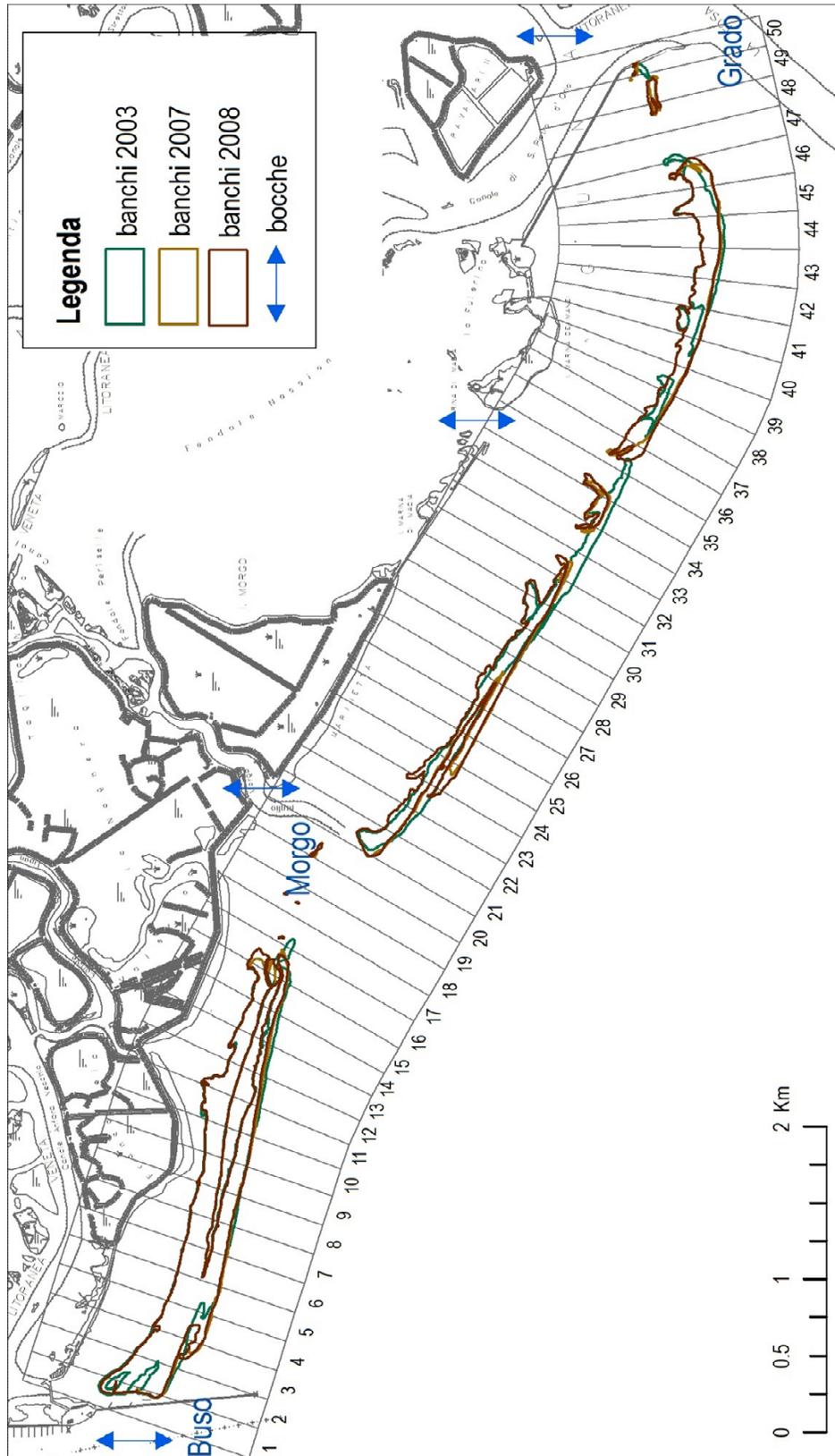
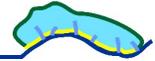
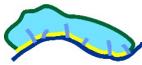


Figura 4.65. Evoluzione dei banchi tra il 2002 e il 2008.



Essendo gli intervalli temporali più ridotti rispetto ai casi finora considerati, le variazioni riscontrate sono di minor entità.

- Per quanto concerne il banco d'Anfora si assiste alla geminazione e allo sviluppo verso ovest di uno spit appena abbozzato nel 2003 e all'arretramento, piuttosto contenuto, della linea di riva nella porzione centro-orientale del banco stesso.

- nella parte centrale dalla cella n. 21 alla cella n. 50 si assiste a un variazioni significative ma con andamento altalenante sia delle superfici che della posizione della linea di riva. Ciò è determinato da vari eventi: la progradazione verso ovest di un nuovo spit a partire dalla cella 28 a interessare il banco fino alla cella 21; la frammentazione del corpo centrale del banco d'Orio presente nel 2003, con la formazione di due nuove bocche tidali separate da un piccolo banco emerso situato fra le celle n. 33 e n. 35;

- Il banco dei Tratauri presenta una progradazione verso ovest che ha interessato la zona compresa tra le celle n. 36 e 41. Infine, Il piccolo banco emerso situato in prossimità della scogliera di San Pietro d'Orio è migrato verso Ovest.

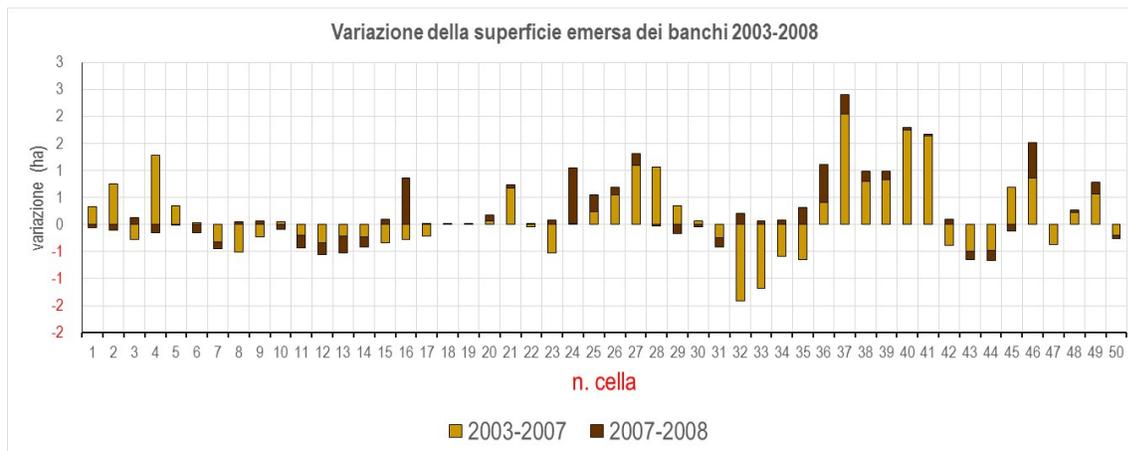


Figura 4.66. Variazioni della superficie emersa negli intervalli temporali 2003-2007 e 2007-2008.

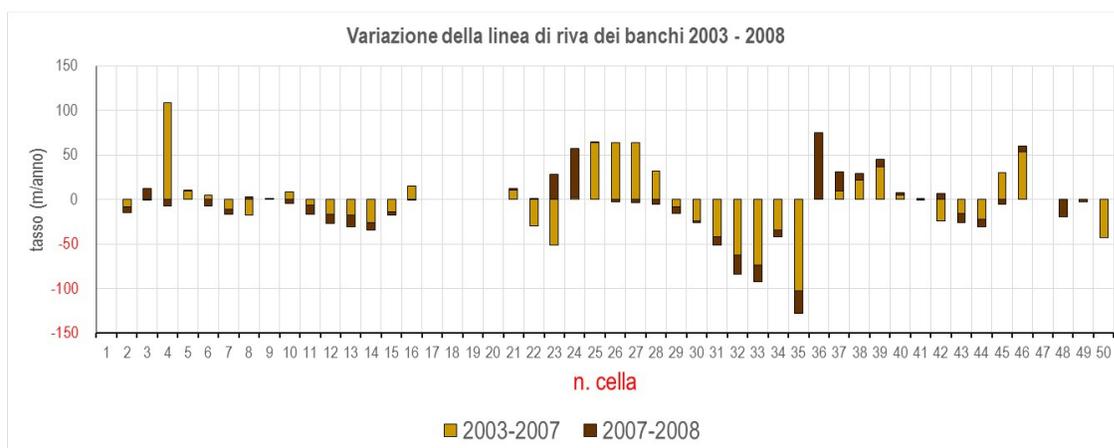
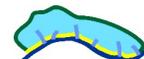


Figura 4.67. Variazione della posizione della linea di riva dei banchi negli intervalli temporali 2003-2007 e 2007-2008.



### *Variazione superficiale dei banchi e analisi della linea di riva tra il 2008 e il 2015*

Le modificazioni avvenute sui banchi riferite tra il 2008 e il 2015 sono mostrate nella mappa di Figura 4.68 e nei grafici di Figura 4.69 e di Figura 4.70. Il confronto tra le perimetrazioni dei banchi del 2008 e quelle del 2012, ricavate entrambe dalle foto aeree digitali messe a disposizione dalla Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia, ha evidenziato le seguenti modificazioni morfologiche.

- Parte occidentale: l'estremità occidentale del Banco d'Anfora ha subito un aumento di superficie per il tratto di litorale compreso tra le celle n. 1 e n. 7, determinato dalla geminazione di due spit, secondo un processo di accrescimento iniziato già nel 2004. Nella zona centrale invece, compresa tra le celle n. 8 e n. 13, ha subito una modificazione morfologica molto marcata: nell'intervallo di tempo 2008-2012 si assiste infatti all'apertura di un varco (washover-fan) nel banco più esterno, rimettendo in comunicazione il piccolo specchio d'acqua presente alle spalle con il mare aperto. Il processo di washover ha determinato un arretramento della linea di riva e dapprima una diminuzione delle superfici emerse seguita però nel secondo periodo da una fase di riadattamento parzialmente ricostruttiva con aumento di superficie. La parte orientale del banco mostra un arretramento della linea di riva nella zona compresa tra le celle n. 15, 16 e 17.

-Parte centrale: il banco d'Orio mostra un andamento simile a quello del banco d'Anfora con una fase fortemente accrescitiva per entrambi i periodi nella porzione occidentale (dalla cella n.17 alla n. 23), si tratta dell'ennesima fase di progradazione di uno spit verso nord-ovest che ha fatto migrare la piccola bocca tidale di Morgo molto più a ovest rispetto alla posizione assunta nel 2008. Nello stesso tempo un arretramento molto marcato della linea di riva con conseguente perdita di superficie emersa ha interessato le celle tra la n. 24 e 32.

- Parte orientale: i piccoli accumuli sabbiosi situati a ridosso della scogliera del canale d'accesso al porto di Grado, compresi all'interno delle celle n.48, 49 e 50, hanno subito piccole variazioni areali di segno positivo. Il troncone principale del banco dei Tratauri (celle dalla 34 alla 47), pur mantenendo la stessa morfologia e orientazione, ha subito un assottigliamento ed un allungamento sia verso la diga di San Pietro d'Orio che verso Nord-Ovest, unendosi alla piccola porzione del banco d'Orio presente nel 2008.

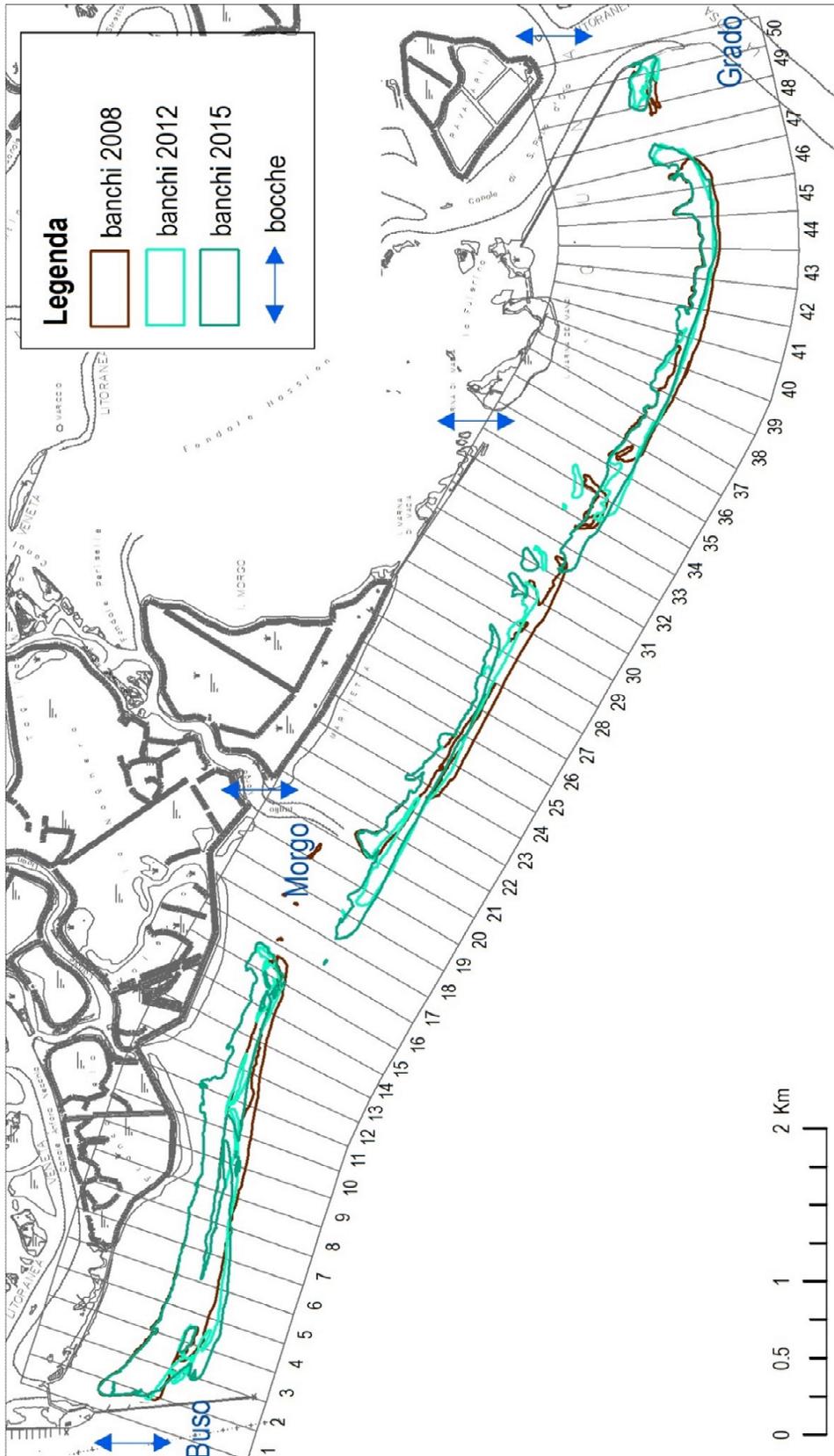
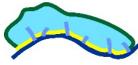


Figura 4.68. Variazioni superficiali dei banchi d'Anfora, d'Orio e dei Trattauri tra il 2008 e il 2012.

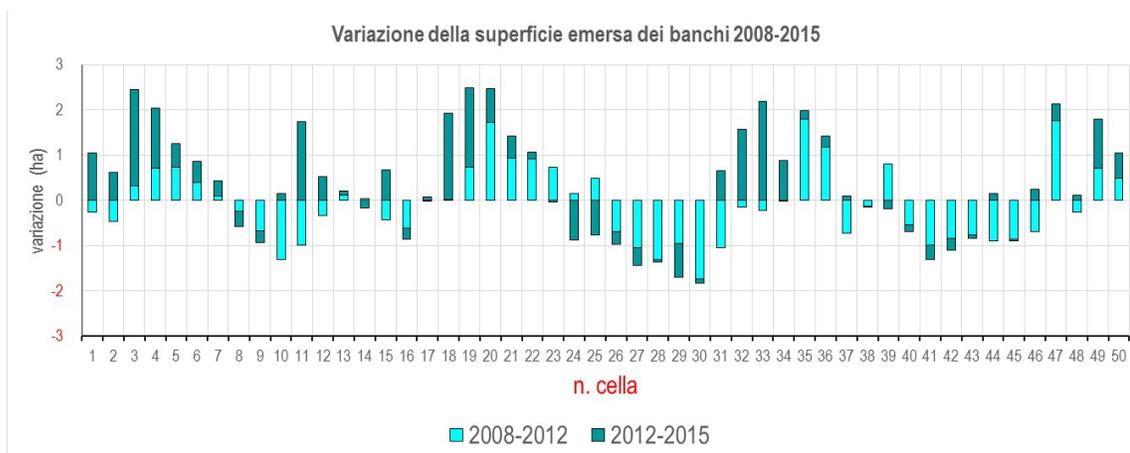
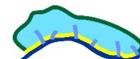


Figura 4.69. Variazioni della superficie emersa negli intervalli temporali 2008-2012 e 2012-2015.

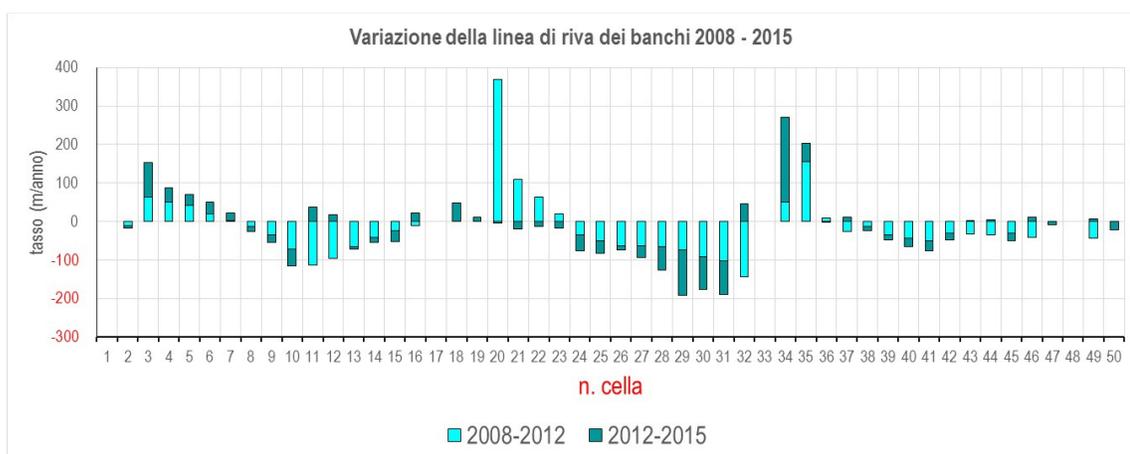
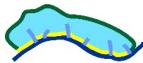


Figura 4.70. Variazione della posizione della linea di riva dei banchi negli intervalli temporali 2008-2012 e 2012-2015.



### Sintesi dei processi

Analizzando l'evoluzione complessiva dei banchi per ciascuna annata si ricava un andamento temporale relativo a 120 anni, all'interno del quale grazie all'analisi di foto-interpretazione e rilievo sul campo, sono state individuate le più frequenti tipologie di processi geomorfologici, che sono responsabili di queste modificazioni e rendono i banchi una realtà estremamente dinamica e complessa. Essi sono di seguito descritti.

**Avanzamento:** semplice processo di avanzamento del banco con progradazione della linea di riva verso mare.

**Arretramento:** processo di arretramento del banco che consiste in una migrazione verso terra della linea di riva; esso può coinvolgere solo la parte verso mare del sistema spiaggia (erosione frontale) con l'erosione della berma o della duna e la formazione di zappature erosive oppure può coinvolgere l'intero banco provocandone la traslazione verso terra soprattutto nel caso di morfologie di spiaggia non completamente strutturate o su intervalli di tempo più lunghi.

**Washover:** processo repentino che avviene a opera del moto ondoso di tempesta che irrompe sul cordone litorale determinando particolari forme di erosione sulla spiaggia emersa e conseguente deposito di corpi sabbiosi, detti *washover fan* o ventagli di rotta. Gli eventi di washover, se meno intensi, hanno la capacità di appiattire le forme della spiaggia e possono determinare accumuli sabbiosi sub-aerei nella zona di retro-barriera (Figura 4.71). Gli eventi più intensi possono aprire dei veri e propri varchi lungo il cordone litorale mettendo in comunicazione la laguna retrostante con il mare aperto (Figura 4.72), in questo caso i depositi di *washover* si accomodano come forme subacquee sul fondale lagunare alle spalle del banco originario in forma di corpi allungati o radiali quali lingue, lobi e ventagli.

**Progradazione di spit:** le correnti lungo riva (*longshore*) responsabili della continua migrazione delle sabbie lungo la spiaggia sottomarina e intertidale determinano la formazione di corpi sabbiosi che si sviluppano parallelamente a esse e alla costa preesistente e che prendono il nome di frecce litorali o *spit*. Gli spit possono accrescersi rapidamente con tassi anche molto elevati; l'estremità libera del corpo, ovvero quella non saldata alla costa, presenta generalmente una morfologia a uncino causata dal fenomeno di rifrazione delle onde. Nel nostro caso le analisi storiche effettuate hanno messo in evidenza la formazione nel tempo di diversi spit secondo la direzione di trasporto longshore predominante, ovvero da est verso ovest. Nell'esempio di Figura 4.73 dal 2003 al 2007 lo spit si è allungato verso NE di 750 m circa, pari a un tasso di accrescimento medio di ben 188 m/anno.

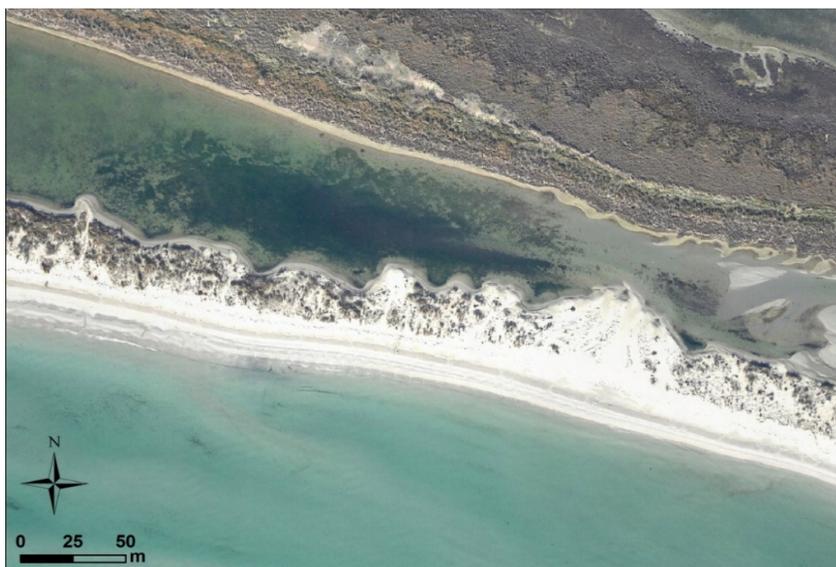


Figura 4.71. Tratto del banco d'Anfora interessato da fenomeni di washover di lieve entità identificabili in piccoli accumuli sabbiosi di forma lobata in corrispondenza della linea di riva rivolta verso la laguna.

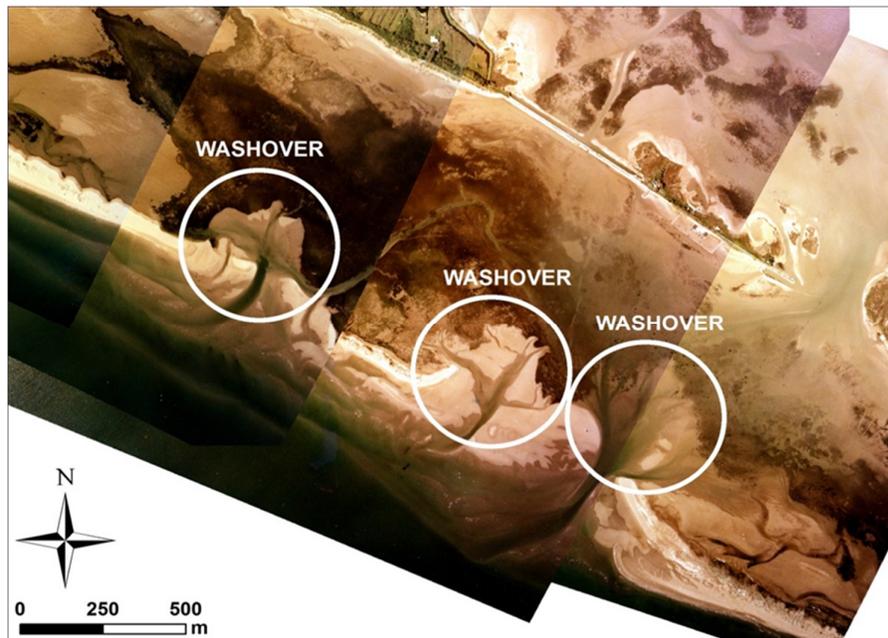
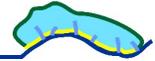


Figura 4.72. Foto aerea del banco d'Orio del 1978. In evidenza i ventagli di rotta (washover fans) che costituiscono un vero e proprio varco nella continuità del banco. Questi varchi sono spesso destinati a richiudersi abbastanza rapidamente grazie al trasporto dei sedimenti lungo riva.

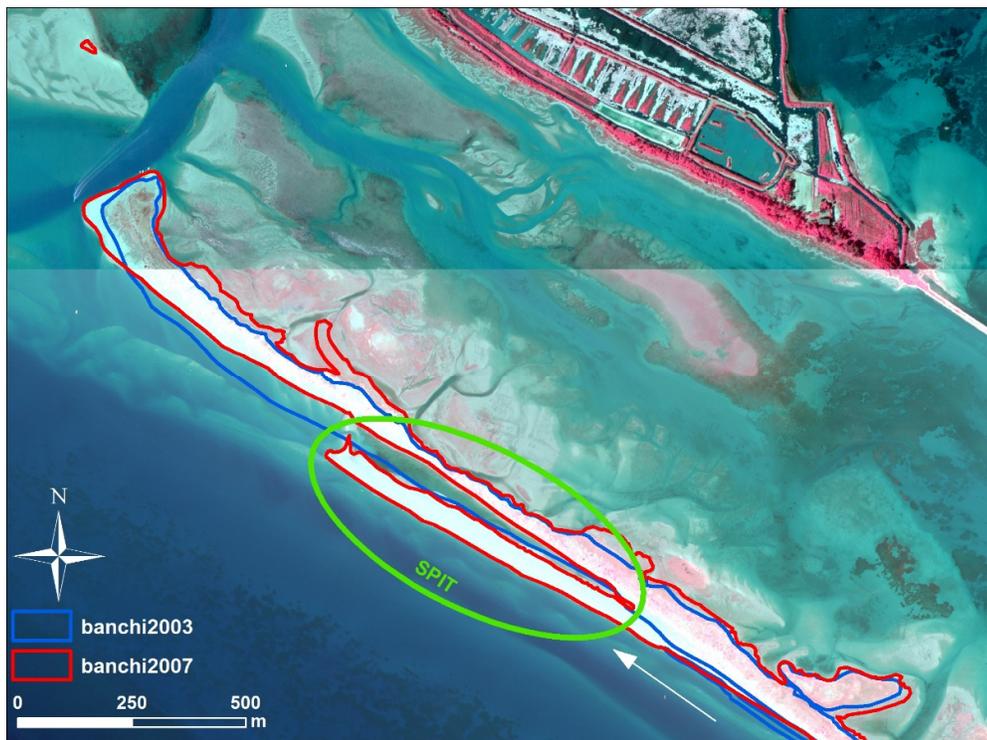
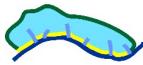


Figura 4.73. Foto aerea del banco d'Orio del 2007 (Regione Autonoma del Friuli Venezia Giulia - 17/07/2007). Il cerchio verde evidenzia lo spit (freccia litorale) allungatosi secondo la direzione del trasporto longshore dominante, indicata dalla freccia bianca.

In sintesi il comportamento morfodinamico dei banchi può essere descritto dai seguenti parametri:  
 -dinamicità (intesa come variazione della superficie nel tempo)



- estensione complessiva della superficie emersa
- posizione della linea di riva

I grafici che seguono rappresentano l'andamento nel tempo di ciascuno di questi parametri (Figura 4.74, Figura 4.75, Figura 4.76).

Il grafico di Figura 4.74 mostra l'entità delle variazioni (in ha) della superficie emersa dei banchi per ogni coppia di anni analizzata dal 1938 al 2015. Si tratta, come già visto, di variazioni sia positive (accrescimenti) che negative (erosioni) che evidenziano come i processi morfodinamici siano responsabili di rilevanti modifiche sia costruttive che distruttive. Il loro bilancio (rappresentato in grigio) risulta positivo nella maggior parte degli intervalli di tempo, a testimonianza di una tendenza generale positiva (come vedremo meglio nel prosieguo). Dal punto di vista quantitativo si tratta di estensioni significative con variazioni che raggiungono tassi massimi negativi di -5.1 ha/anno e positivi di 12.74 ha/anno.

Per quel che riguarda la variazione progressiva nel tempo delle superfici emerse nel grafico di Figura 4.75 sono rappresentate le superfici emerse per ciascun anno sia per i banchi nel loro complesso (linea gialla) sia per ciascuno dei tre banchi. Appare evidente un andamento nel complesso positivo, con un progressivo aumento della superficie emersa dei banchi, seppur con fasi alterne che come già visto sono state caratterizzate da perdita di superfici.

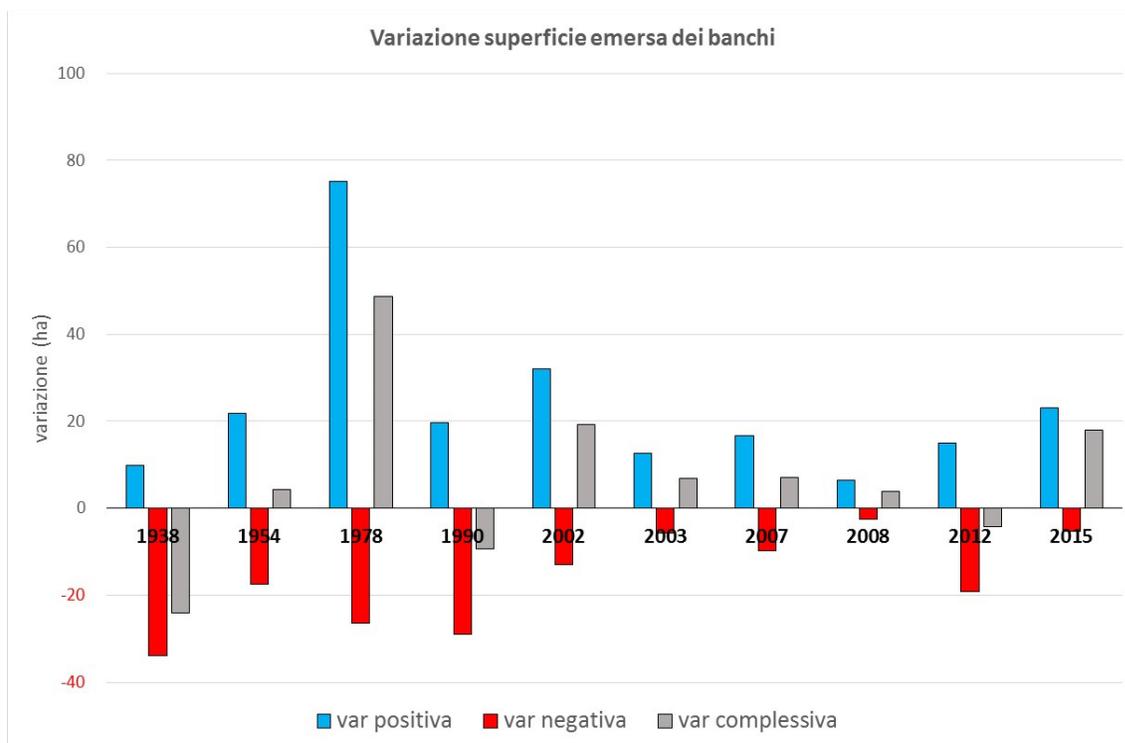
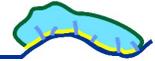


Figura 4.74. Entità delle variazioni della superficie emersa dei banchi per ogni anno di analisi rispetto al precedente (primo anno 1894).

Come evidenziato dai dati del grafico di Figura 4.75 il sistema dei banchi sabbiosi esterni, nonostante la variabilità appena citata, ha subito nell'intero intervallo di tempo considerato, un notevole aumento di superfici emerse, quantificabile in 70.48 ha complessivi per il periodo 1891 - 2015. Dal 1891 al 1954 si evidenzia una leggera perdita di superfici emerse seguita, seppur a fasi alterne, da un trend nettamente positivo fino al 2015.

Per quanto concerne invece la variazione della linea di riva (Figura 4.76), il sistema è stato caratterizzato da una prima fase progredante (1891 - 1954) per poi subire un leggero ma costante arretramento,



quantificato in 55.5 m circa rispetto alla posizione assunta nel 1954. Ciò sembrerebbe indicare una fase di arretramento generalizzato dei banchi ascrivibile a un tipico processo di *rollover*, associabile all'innalzamento del livello del mare. Si tratta di uno dei possibili adattamenti delle isole barriera all'innalzamento del livello del mare che consiste in una traslazione dell'isola barriera verso terra, mantenendo nel suo complesso la sua identità morfologica e senza perdita significativa di sedimenti.

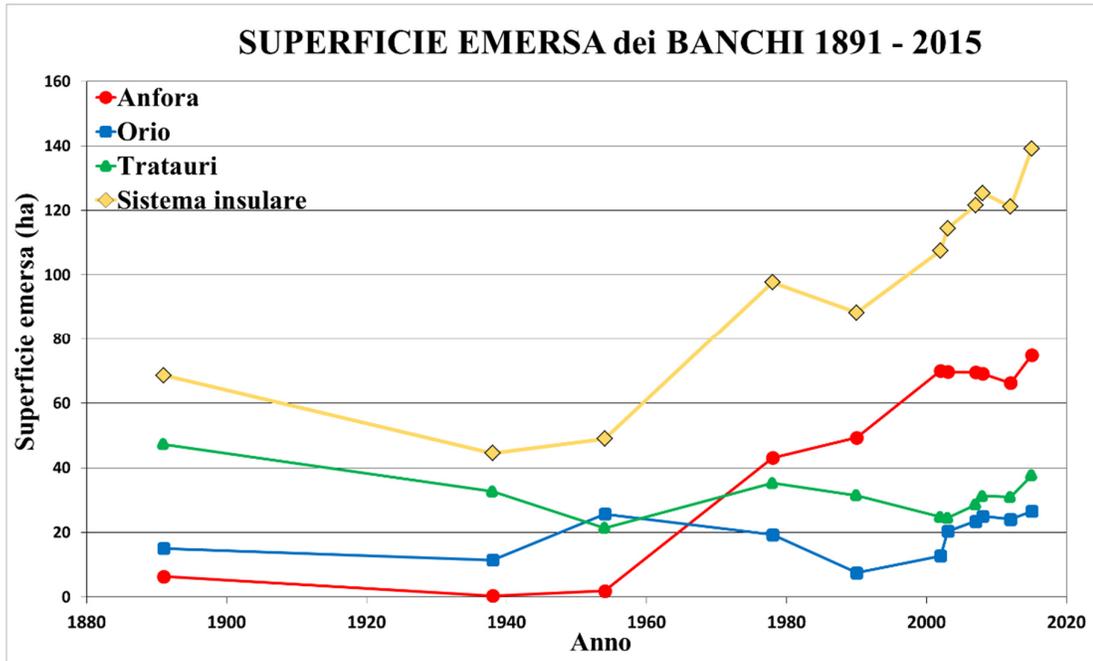


Figura 4.75. Variazione della superficie totale emersa dei banchi dal 1891 al 2015. La linea gialla indica la variazione evidenziata dal sistema insulare nel suo complesso.

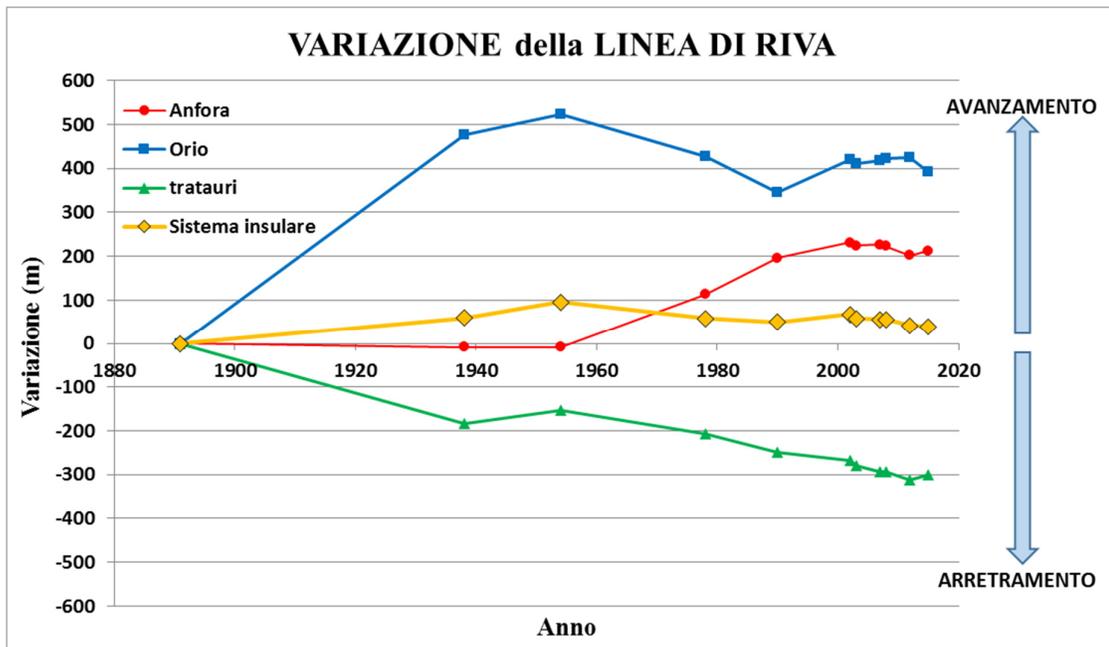
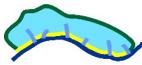


Figura 4.76. Variazione della linea di riva dei banchi dal 1891 al 2015. La linea gialla indica il comportamento evidenziato dal sistema insulare nel suo complesso.



Analizzando gli spostamenti della linea di riva e l'estensione delle superfici si denotano però comportamenti diversi dei singoli banchi, legati alla loro posizione rispetto al trasporto longshore, al moto ondoso e alla presenza delle bocche lagunari di Grado e Porto Buso.

Il banco dei Tratauri ha mostrato un arretramento costante della linea di riva (*rollover*) con variazioni alterne delle superfici emerse. L'orientazione del banco e la sua vicinanza con la bocca lagunare di Grado limitano sicuramente l'input sedimentario esterno, legato alle dinamiche longitudinali, relegandolo alle dinamiche trasversali che determinano un arretramento progressivo del banco (*rollover*) per effetto dell'innalzamento del livello marino.

Il banco d'Orio invece, è avanzato verso mare fino al 1954 per poi subire un leggero arretramento della linea di riva fino al 1990, quando il banco sembra si sia stabilizzato; comportamento analogo è stato evidenziato per le superfici emerse. Il sedimento eroso dalla porzione occidentale del banco dei Tratauri alimenta il banco d'Orio che si autosostiene grazie alla forte compensazione longshore. Le dinamiche longitudinali quindi, mascherano l'effetto legato a quelle trasversali long-term che non consentono al banco di accrescersi verso mare, ma solo lateralmente attraverso la formazione e l'allungamento di spit. Il banco d'Anfora mostra per l'intero periodo di confronto un avanzamento molto marcato della linea di riva accompagnato da un notevole aumento di superfici emerse; tale effetto è sicuramente legato all'avvicendamento tra i processi di progradazione e rinsaldamento degli spit al banco principale. Dal 1954 al 1990 il banco ha evidenziato un comportamento opposto a quello del banco d'Orio; infatti, Anfora beneficia dagli apporti *longshore* che derivano dal sistema di transito sedimentario rappresentato da quest'ultimo.

Come appare evidente dai dati appena esposti l'esistenza dei banchi e la loro peculiarità è indissolubilmente legata alla loro dinamicità. In questo caso il concetto di conservazione assume significato e applicazione del tutto peculiari in quanto quasi la maggior parte della loro estensione sia emersa che sommersa è destinata a modificarsi in tempi rapidi e anche repentinamente. In base all'attuale disponibilità di dati, gli elementi appena descritti (dinamicità intesa come variazione della superficie nel tempo, estensione complessiva della superficie emersa, posizione linea di riva) possono essere assunti quindi a titolo di indicatori di un buon stato morfodinamico del sistema.

#### 4.6.4. Isole barriera: stato di conservazione

L'evoluzione nel tempo delle isole barriera di Martignano e Sant'Andrea è stata ricostruita grazie alla disponibilità di foto aeree che copre un arco temporale di 60 anni.

##### *Martignano*

Analizzando i soli due estremi dell'intervallo temporale considerato (1954 – 2014) l'evoluzione dell'isola di Martignano viene mostrata in

Figura 4.78. Per comodità di descrizione il litorale è stato suddiviso in quattro tratti denominati A,B,C,D. la cui ubicazione è mostrata nella stessa figura. In tutta la parte frontale della spiaggia, orientata in direzione ovest - est (tratto D e tratto C), la linea di riva attuale si attesta in una posizione più avanzata verso mare rispetto alla situazione del 1954. Per la porzione che limita il canale della bocca di Sant'Andrea, invece, la linea di riva appare pressoché invariata nella parte più esterna per circa 400 m (tratto B) mentre mostra importanti arretramenti nel tratto più interno (superiori ai 100m), a partire dallo sbocco del canale secondario verso nord (tratto A).

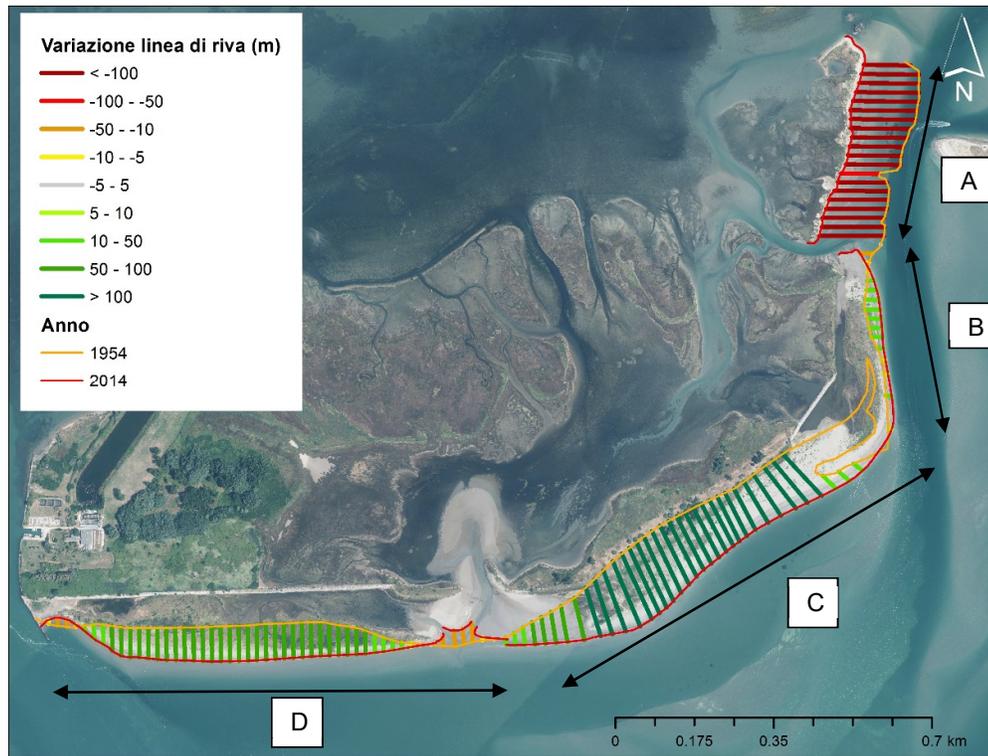
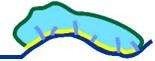


Figura 4.78. Le linee di riva dell'isola di Martignano nei due estremi temporali dell'arco di tempo considerato: 1954 – 2014, per chiarezza la linea di costa è stata suddivisa in tratti. La quantificazione delle variazioni della linea di riva è rappresentata attraverso transetti equispaziati di venti metri e perpendicolari alla linea di riva, si tratta dei transetti fittizi che vengono utilizzati per il calcolo in ArcGIS.

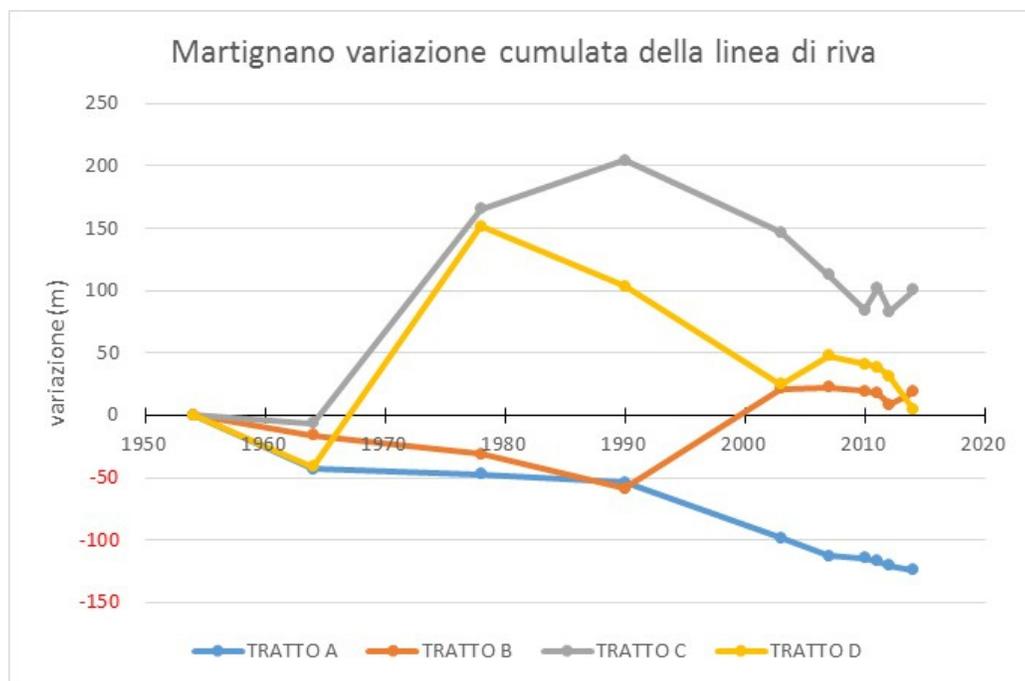
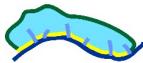


Figura 4.77. Variazione cumulata della linea di riva per differenti tratti della spiaggia di Martignano (l'ubicazione dei tratti è riportata in figura 14).



Volendo analizzare con maggior dettaglio i differenti intervalli temporali e le modificazioni intercorse è necessario citare i principali interventi antropici che hanno interessato l'isola, ricostruiti grazie ai documenti analizzati (foto aeree, cartografia, Brambati 1987):

-Tra il 1954 e il 1964: costruzione di una difesa in massi all'estremità ovest in corrispondenza della bocca di Lignano per un tratto lungo circa 350 m.

-Tra il 1964 e il 1978: rafforzamento e prolungamento del suddetto molo fino a 450 m circa .

-Tra il 1978 e il 1990: costruzione di una difesa parallela alla linea di riva a partire dal suddetto molo in direzione ovest – est per una lunghezza di circa 830 m e imbonimento dell'area retrostante con apporto di sedimenti, costruzione di un'altra massicciata lunga circa 180 nel tratto C a chiusura di un canale naturale che collegava la retrostante area a barena con la bocca di Sant'Andrea, il canale non era ancora presente nella foto del 1978 e l'intervento è stato realizzato successivamente, probabilmente in seguito a una rotta che aveva determinata l'apertura di una nuova bocca.

Le modificazioni occorse alla linea di riva sono sintetizzate nel grafico di Figura 4.77 dove, per ciascun tratto di litorale, i dati rappresentano l'andamento medio nel tempo dei valori misurati lungo ciascun transetto fittizio. Il grafico evidenzia come soltanto per il tratto A la linea di riva più recente si attesti su una posizione più arretrata rispetto al momento zero (anno 1954) mentre per tutti gli altri tratti la linea di riva più recente risulta avanzata verso mare.

Per quel che riguarda gli andamenti della curva il comportamento si differenzia di tratto in tratto.

Il **tratto A** mostra un continuo arretramento che, pur con alcuni periodi di stasi, non mostra mai dati in controtendenza. Il tasso medio per l'intero periodo è pari a -1.9 m/anno. L'arretramento ha determinato una vera e propria migrazione della spiaggia verso l'interno della laguna: i depositi sabbiosi di spiaggia, sospinti dal vento e dalle mareggiate, hanno così dapprima sormontato e poi "scavalcato" le preesistenti barene e ghebi i cui residui sono tuttora visibili sui bassi fondali adiacenti. Si tratta di un processo legato alla migrazione della bocca tidale di Sant'Andrea in risposta al continuo accrescimento dell'estremità occidentale dell'omonima isola, come vedremo meglio più avanti.

Il **tratto B** è caratterizzato da una prolungata fase iniziale di lento arretramento fino al 1990, seguita da una fase ripascitiva, da una stasi nell'intervallo 2003 e 2012 e, da ultimo, da due brevi fasi contrastanti di cui l'ultima accrescitiva.

Per i **tratti C e D** l'attuale posizione rappresenta in realtà il risultato di una forte fase di avanzamento verificatasi tra il 1964 e il 1978, momento che ha conciso con il prolungamento della massicciata in aderenza alla bocca di Lignano. A questo periodo risale la formazione di un esteso banco sabbioso emerso distaccato dal corpo dell'isola (in realtà costituito in questo tratto da uno stretto banco emerso fino all'imbonimento degli anni 80). A questa fase è seguita una fase di arretramento piuttosto significativa che però non ha del tutto vanificato l'avanzamento precedente. Dal 2003 in poi i valori di variazione sono meno elevati e divengono discordanti per i due tratti. Mentre per il tratto C la fase di arretramento sembra essere contrastata da eventi ripascitivi, il tratto D sta attraversando una fase di significativo arretramento che lo ha riportato in media a una posizione simile a quella di partenza del 1954. I già citati interventi antropici di difesa costiera potrebbero aver favorito le modificazioni avvenute nel corso del tempo ma la connessione causa - effetto non appare del tutto chiara.

I fenomeni recenti più evidenti sono la rottura per washover sul tratto D e l'arretramento del tratto C con colmamento della lama d'acqua retrostante da parte delle sabbie sottratte alla spiaggia. Il washover del tratto D si è impostato sulla cicatrice di un precedente evento appena abbozzato nella foto del 1978 e ancora visibile anche se ormai inattivo nella foto del 1990, a testimonianza della presenza di un punto di convergenza dell'energia delle onde, imputabile alla conformazione dei fondali adiacenti. La vivace dinamica costiera recente ha determinato la formazione di estese superfici a sabbia nuda che costituiscono habitat di pregio per la nidificazione di specie ornitiche di interesse comunitario. Nello stesso tempo i vistosi arretramenti e l'erosione degli ambienti di duna, già scarsamente presenti, costituiscono un aspetto senz'altro delicato nell'evoluzione recente dell'isola; esso richiede di essere monitorato attentamente assieme all'evoluzione delle bocche di Lignano e Sant'Andrea, responsabili della



conformazione dei fondali antistanti l'isola, per poter comprendere se sarà necessario in futuro un intervento di protezione.

Il contesto morfodinamico è complicato dal fatto che si tratta di un'isola poco estesa limitata a due lati da due bocche tidali che ne influenzano in maniera significativa l'evoluzione (Segala, 1999). Dal comportamento delle due bocche dipende anche l'eventuale possibilità di emersione e /o rinsaldamento alla terraferma dei banchi attualmente sommersi, che potrebbero riportare la spiaggia verso una situazione di accrescimento.

Per quel che riguarda l'isola di Sant'Andrea nel corso degli ultimi 60 anni la linea di riva ha subito vistose modificazioni soprattutto alle due estremità. Esse sono state quantificate nel dettaglio grazie alla digitalizzazione delle linee di riva desunte dalle foto aeree disponibili a partire dal 1954. Un'idea complessiva delle modificazioni intervenute nel complesso viene fornita dalla Figura 4.79 che presenta la sola coppia di linee di riva 1954 – 2014 e la quantificazione della variazione lungo una serie di transetti fittizi. Appare evidente come in generale si assista a una tendenza dell'isola barriera a ruotare in senso orario con un arretramento nel settore occidentale e vistosi avanzamenti della linea di riva in quello orientale a ridosso del molo foraneo di Porto Buso. Per chiarezza di esposizione dei dati l'isola di Sant'Andrea è stata suddivisa in differenti tratti denominati A, B, C, D, E, F, che nel tempo hanno mostrato un comportamento abbastanza omogeneo e che sono mostrati nella figura Figura 4.79.

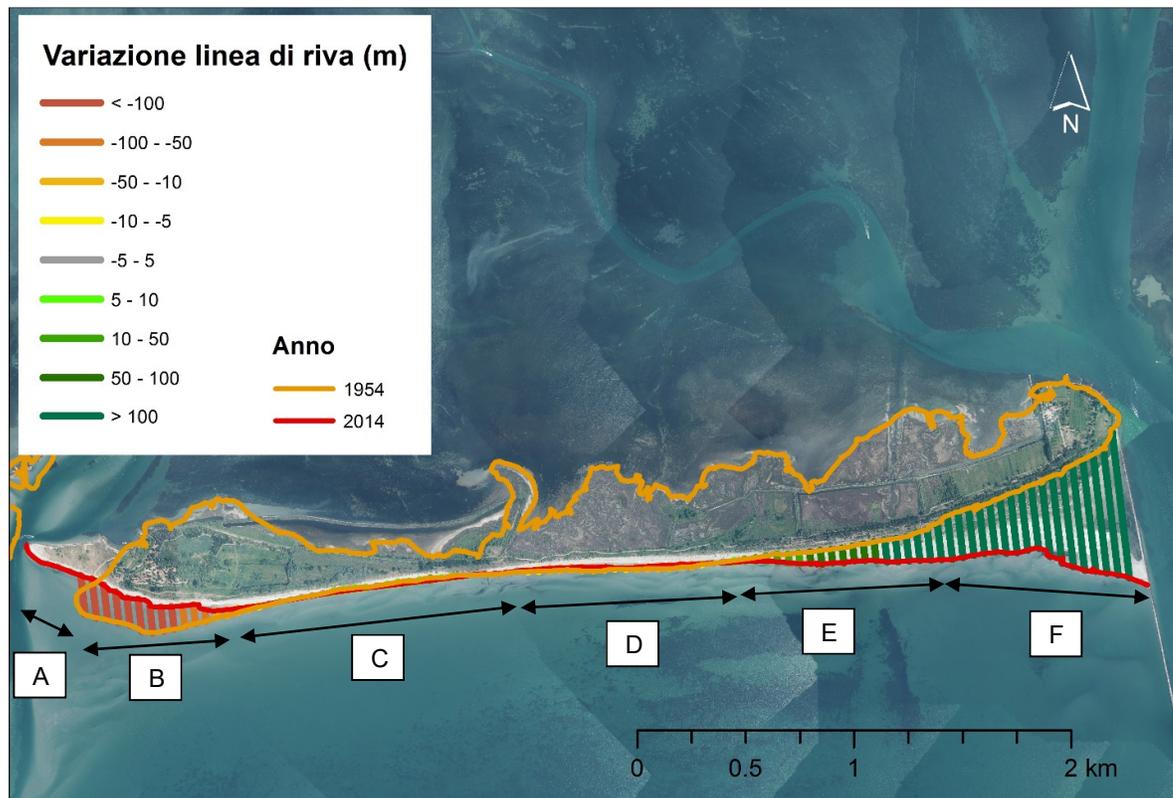
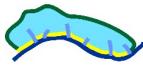


Figura 4.79. Le linee di riva dell'isola di Sant'Andrea nei due estremi temporali dell'arco di tempo considerato: 1954 – 2014. La quantificazione delle variazioni della linea di riva è rappresentata attraverso transetti fittizi equispaziati di 50 m e perpendicolari alla linea di riva, si tratta dei transetti che vengono utilizzati per il calcolo in ArcGIS.

Nello stesso intervallo di tempo si collocano anche alcuni importanti interventi antropici quali:



-Tra il 1968 e il 1971 realizzazione di: tre corti pennelli in massi lungo il tratto B, di una difesa radente in calcestruzzo nella porzione centrale dell'isola per una lunghezza di 200m compresa tra due pennelli alle estremità e del molo guardiano di Porto Buso (Brambati,1971).

-Tra il 1978 e il 1990: bonifica della porzione orientale dell'isola con colmamento delle barene e delle lame d'acqua e arginatura di una grande valle da pesca.

Analizzando con maggior dettaglio i differenti intervalli temporali, le modificazioni intercorse possono essere sintetizzate nel grafico di Figura 4.80.

L'arretramento della linea di riva all'estremità occidentale (tratto A) è il risultato della rotazione e dell'allungamento verso ovest dell'estremità dell'isola (spit) che porta la bocca di Sant'Andrea a migrare progressivamente verso ovest. L'estremità orientale invece (tratto F) è caratterizzata dall'influenza del molo guardiano di porto Buso, che, come sovente accade con opere così fortemente aggettanti, modifica in maniera significativa le correnti, la dinamica delle onde sotto-costa e di conseguenza il trasporto dei sedimenti. Le evidenze morfologiche mostrano con chiarezza la presenza di una direzione locale di trasporto dei sedimenti da ovest verso est in contrasto con quella generale del paraggio costiero (che è prevalentemente da est verso ovest). Essa ha determinato la progressiva formazione di una serie di frecce litorali (spit) che si sono man mano rinsaldate alla linea di riva originaria e al molo stesso determinando un'estesa area di neo-formazione di poco emersa ed estremamente importante per la nidificazione della fauna ornitica (Sponza et al., 2015; Cosolo et al., 2015).

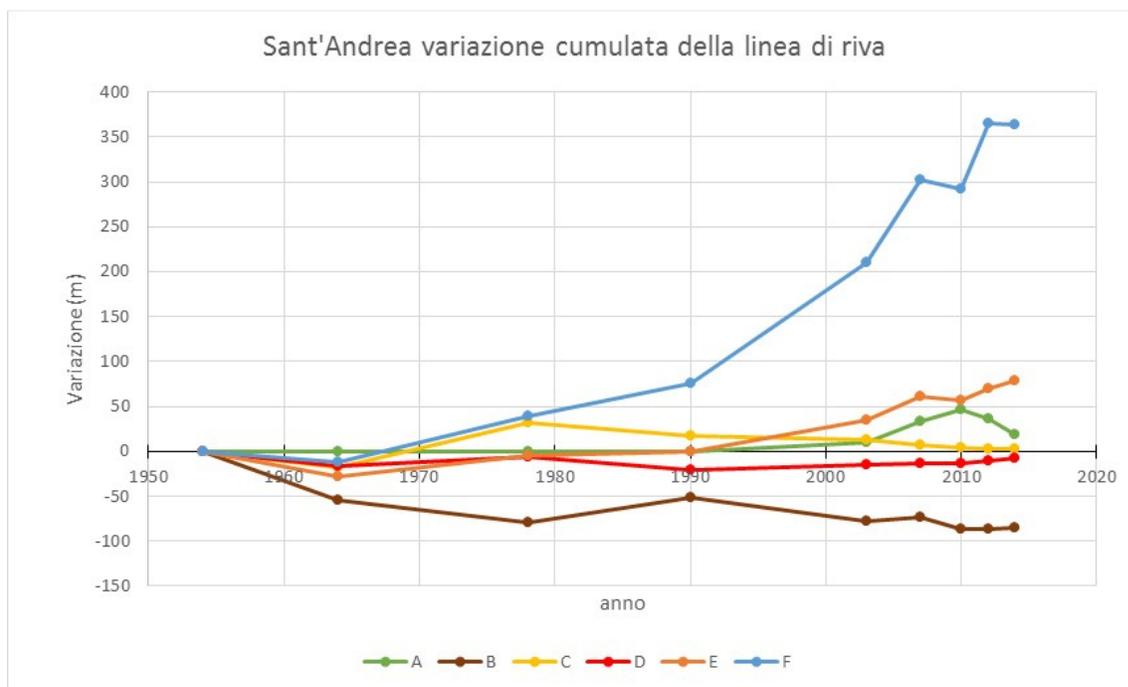
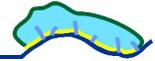


Figura 4.80. Variazione cumulata della linea di riva per differenti tratti della spiaggia di Sant'Andrea, l'ubicazione dei tratti è mostrata in figura 16.

Per quel che riguarda la porzione centrale dell'isola (tratti C e D), più volte indicata da varie fonti come un'area a rischio di erosione e rottura, i risultati indicano (come visibile in Figura 4.81) un andamento che si differenzia nello spazio e nel tempo. Il tratto C indica effettivamente un continuo arretramento a partire dal 1978, pur mostrando nell'ultimo intervallo di tempo una, seppur debole, ripresa; si tratta comunque di una variazione che in media fa attestare la posizione più recente della linea di riva quasi in coincidenza di quella del 1954. Il tratto D dopo una fase di arretramento fino al 1990 mostra, invece, un progressivo recupero che porta la posizione attuale sempre nell'intorno dei 10 m rispetto a quella di partenza. Nell'arco



di tempo considerato le diverse riprese aeree non evidenziano mai episodi di rotta, mentre invece esse sono ben documentate per gli altri tratti di litorale (Martignano e banchi).

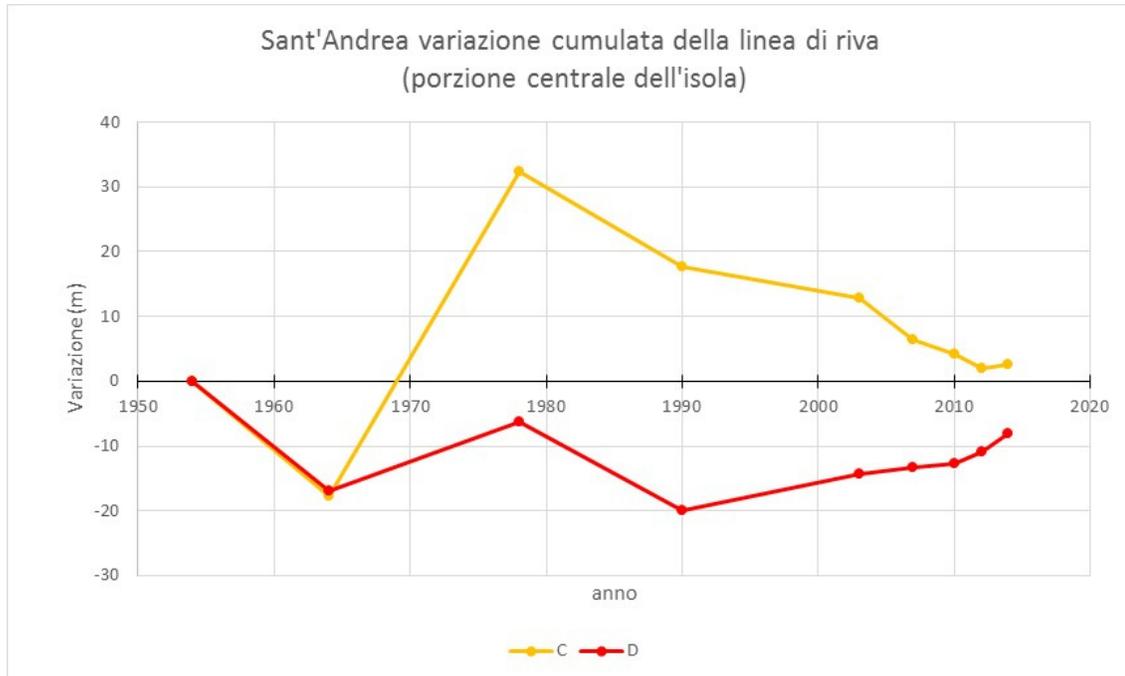


Figura 4.81. Variazione cumulata della linea di riva per la porzione centrale della spiaggia di Sant'Andrea, l'ubicazione dei tratti è mostrata in figura 16.

#### 4.7. Barene

Le barene rappresentano una tra le morfologie più diffuse e tipiche delle lagune e rivestono un ruolo geomorfologico ed ecologico cruciale. Ciò che contraddistingue questi ambienti è la loro dinamicità, legata essenzialmente all'azione della marea, che con le sue fluttuazioni rappresenta il principale fattore di controllo del regime sedimentario.

Le "barene" (*salt-marshes*) possono essere definite come dei *corpi sedimentari composti da materiali fini (argilla e silt), trasportati dalle correnti e stabilizzati dalla vegetazione alofita, tipica delle aree intertidali* (Boorman, 1995).

Un'ulteriore efficace definizione è quella riportata da Bonometto (2003) che le definisce come *veri e propri fondali lagunari corrispondenti alla fascia intertidale superiore, nei quali i caratteri morfologici, strutturali e funzionali sono condizionati dalle variabili legate alla sommersione periodica*.

Le barene si localizzano lungo i contorni delle isole barriera o delle isole interne alla laguna, nella fascia che borda la costa interna lagunare, oppure rappresentano ampie aree deposizionali di delta endolagunare, in corrispondenza dello sbocco dei fiumi in laguna, e infine lungo il bordo dei canali lagunari. La loro morfologia "classica" è costituita da un rilievo dai bordi leggermente rialzati e concavo al centro, solcato dai *ghebi (marsh creeks)*, una rete di canali tidali meandreggianti che si ramificano verso l'interno della barena diminuendo progressivamente di dimensioni e profondità. I ghebi assumono un ruolo fondamentale nell'apporto di sedimento alle barene: attraverso di essi infatti il flusso mareale viene convogliato all'interno delle barene e poi si espande sulle superfici adiacenti.

All'interno della barena sono spesso presenti i chiari (*salt pans*): aree depresse prive di vegetazione che possono essere associati o meno a un reticolo di ghebi.



#### 4.7.1. Dati e metodologia di analisi

Gli studi recenti eseguiti sulle barene della Laguna di Marano e Grado (Fachin 2008; Fontolan et al., 2010; Fontolan et al., 2012; Covelli et al., 2013; Bezzi, 2013) anche grazie alla collaborazione tra Arpa FVG e il Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste hanno analizzato l'evoluzione delle barene nel tempo grazie alla fotointerpretazione di 3 differenti annate di foto aeree: 1954, 1990, 2006.

L'interpretazione delle ortofoto ha consentito di effettuare l'analisi relativamente alla sola estensione delle barene e non permette alcuna valutazione rispetto all'evoluzione delle quote e delle relazioni tra tasso di sedimentazione e innalzamento del livello del mare. L'unico dato disponibile, al momento, per l'analisi delle quote delle barene è il LIDAR del 2008 – 2010, realizzato e gentilmente messo a disposizione dalla Protezione Civile Regionale. I suddetti dati in ogni caso non sono stati sottoposti a procedure di collaudo e presentano alcune problematiche.

Per ciascun set di foto aeree (per i dettagli si veda anche al paragrafo 4.2.2) sono stati digitalizzati i margini delle barene ottenendo così in G.I.S. tre distinti livelli tematici (*feature class*) che rappresentano forma ed estensione delle barene, sottoposti a differenti metodologie di analisi:

**-Barene 1954**, tracciate sulla base delle foto aeree del 1954, volo GAI.

**-Barene 1990**, tracciate sulla base delle foto aeree del 1990.

**-Barene 2006**, tracciate sulla base delle ortofoto digitali a colori, volo 2006, disponibili in consultazione presso il Portale Cartografico Nazionale del Ministero dell'Ambiente.

Le ricerche recenti hanno evidenziato alcuni limiti dei lavori precedenti in merito all'origine e alla distribuzione delle barene in laguna di Grado e Marano. In particolare vi è stata una errata interpretazione della cartografia storica che ha attribuito al bacino di Lignano l'esistenza di estese barene sulla direttrice congiungente l'isola di Martignano e Marano Lagunare.

Nelle figure

Figura 4.83 e

Figura 4.84 è riportata la cartografia storica IGM delle annate 1891, 1938 e 1951. Appare evidente la differente rappresentazione grafica dell'ultima cartografia, unico caso in cui è rappresentato un esteso campo di barene. Le cartografie precedenti non ne indicano traccia e nella foto aerea del 1954 le medesime aree sono state da noi interpretate come velme e non come barene (

Figura 4.82).

Si ritiene pertanto plausibile che le barene del 1951 siano state sovrastimate dal cartografo e più probabilmente che sia stato attribuito lo stesso segno convenzionale a barene e velme. Anche la cartografia del Dorigo conferma questa ipotesi. L'ipotizzata presenza di questa area a barene è stata utilizzata a supporto della tesi che associava la presenza delle barene alla zona dei partiacque tra i differenti bacini idrografici (Brambati, 1988), ipotesi che non pare trovare credito nell'attuale e passata distribuzione delle barene.

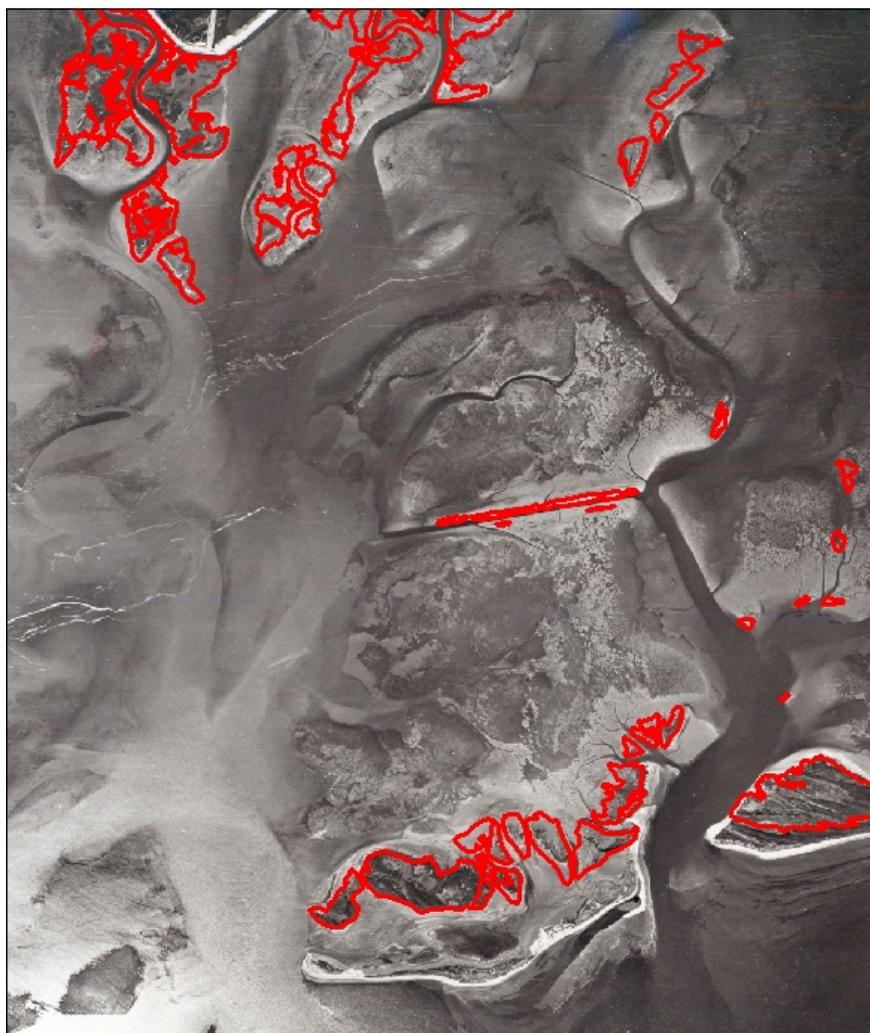


Figura 4.82. Parte della foto aerea del 1954 con perimetrate in rosso le aree interpretate come barene

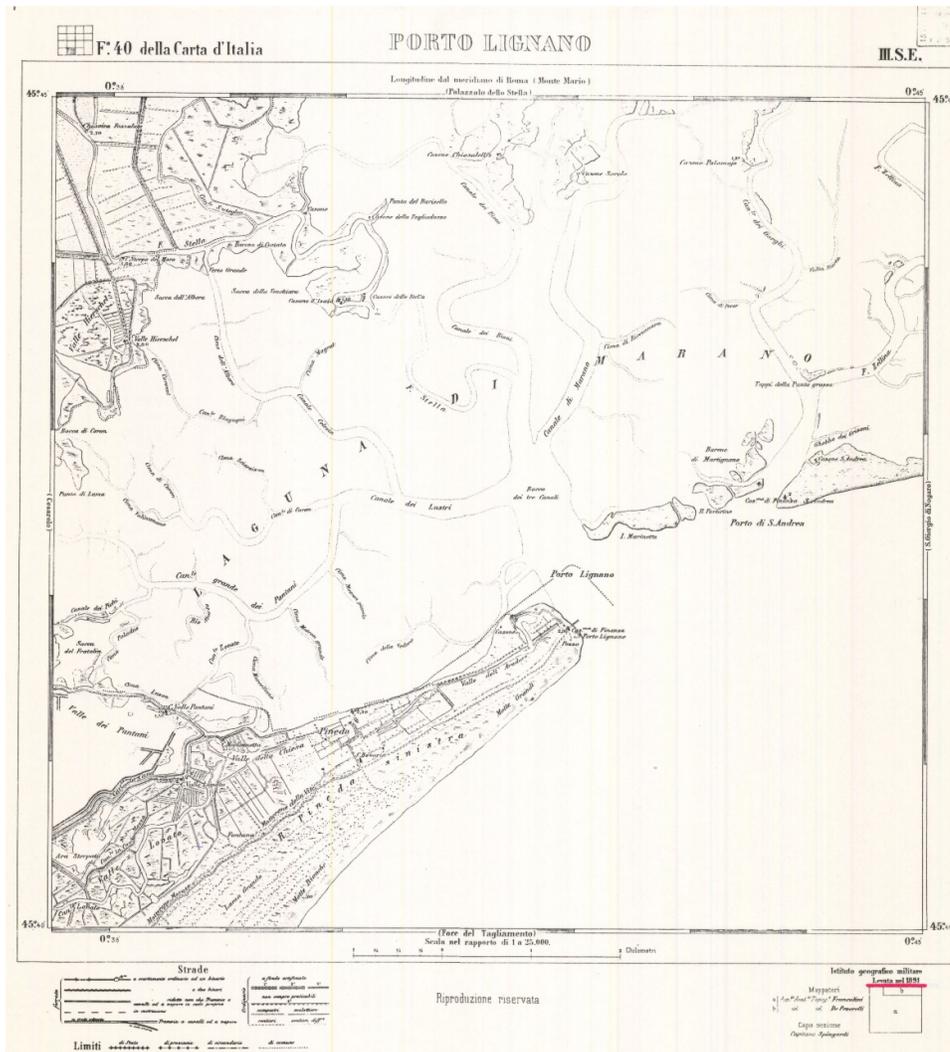


Figura 4.83. Carta IGM levata 1891



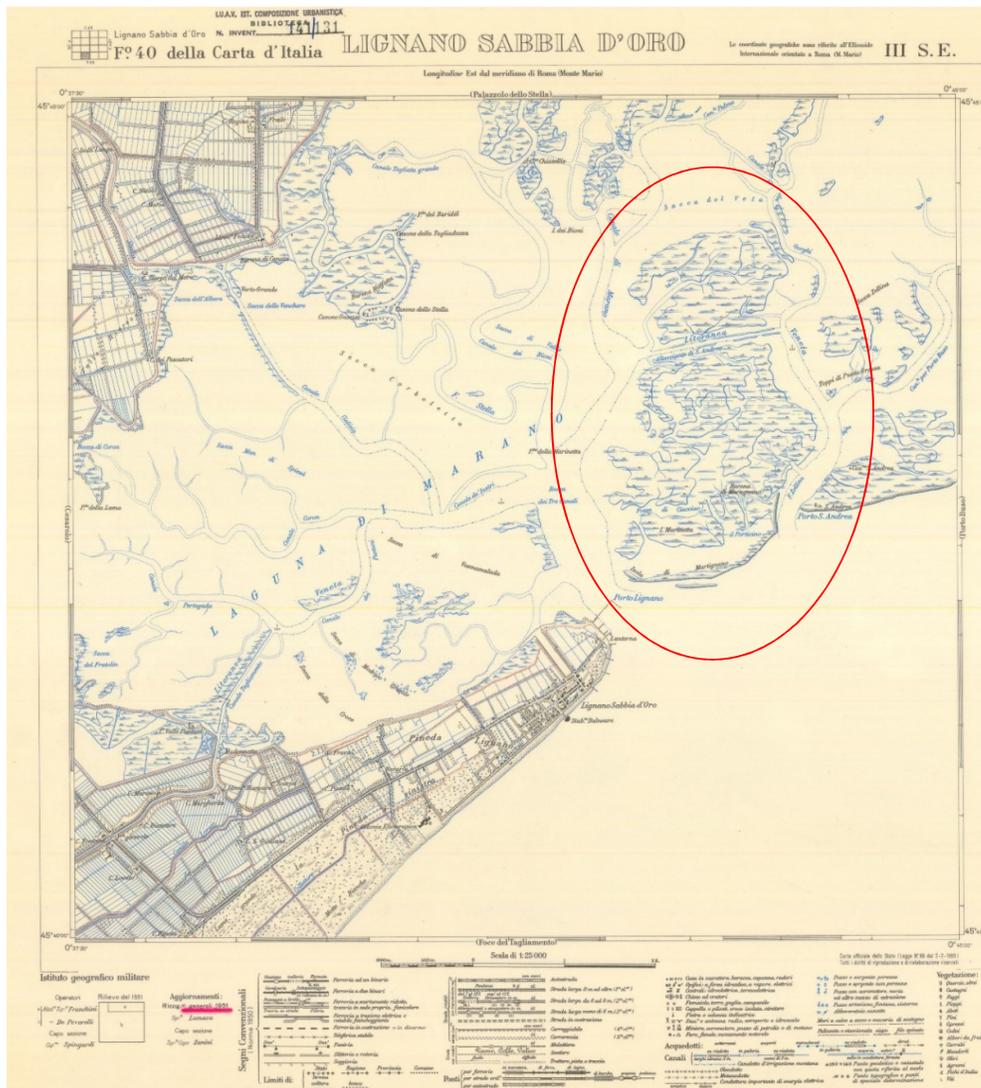
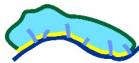


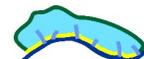
Figura 4.85. Cartografia IGM del bacino di Lignano con aggiornamento 1951.

#### 4.7.2. Stato di fatto

Si riportano di seguito le considerazioni più importanti ricavate dagli studi più recenti sulle barene di Grado e Marano (Fontolan et al., 2012; Covelli et al., 2013; Bezzi, 2013, Bezzi et al., 2015).

#### Distribuzione delle barene

Una differente collocazione fisiografica, origine e caratteri morfologici fanno sì che le barene, pur presentando caratteri comuni, non siano riconducibili a un modello unico e quindi necessitano di interventi e strategie gestionali sito-specifiche.



I recenti studi hanno proposto una classificazione delle barene sulla base del loro ruolo geomorfologico e fisiografico all'interno della laguna suddividendole in 5 differenti tipologie di seguito descritte (Figura 4.86 e Figura 4.87):

- Barene di margine lagunare e delta endolagunare
- Barene di margine di canale
- Barene di retrobarriera
- Barene in bacini paralagunari di recente formazione
- Barene isolate (21ha)

La loro distribuzione in termini quantitativi nei differenti bacini idrografici è rappresentata nel grafico di Figura 4.88.

*Le barene di margine lagunare e delta endolagunare* (estensione complessiva 456ha) bordano il margine interno della laguna, quasi esclusivamente nel bacino di Lignano (444ha) dove costituiscono una frangia pressoché continua, anche se di ampiezza variabile. Essa comprende i protendimenti di importanti delta endolagunari: la Punta della Lama (40.6ha) che corrisponde allo sbocco in laguna del Canale Fosson attraverso l'idrovora Lama; il delta endolagunare del ramo destro (di origine artificiale) del Fiume Stella (39ha); la vasta area a barena che borda il corso meandreggiante del ramo sinistro dello Stella (128ha); il delta endolagunare del fiume Cormor / canale Chiasellis (59ha). L'importanza dell'influenza fluviale è testimoniata anche dalla distribuzione della salinità (Ferrarin et al., 2010) e della vegetazione. In queste barene infatti è presente una commistione di habitat di acque dolci e salmastre. La dominanza del fragmiteto è in genere accompagnata da una struttura tabulare piuttosto monotona, con scarsa presenza di morfologie tidali evidenti ed elevati tassi di accrescimento determinati dall'altra produttività in biomassa tipica di questa specie (Allen, 2000) e dall'apporto di sedimenti fini dai fiumi e dagli sbocchi delle idrovore. Le altre tipologie vegetazionali mostrano invece ghebi a struttura dendritica meandreggiante e chiari con varia dimensione e morfologia.

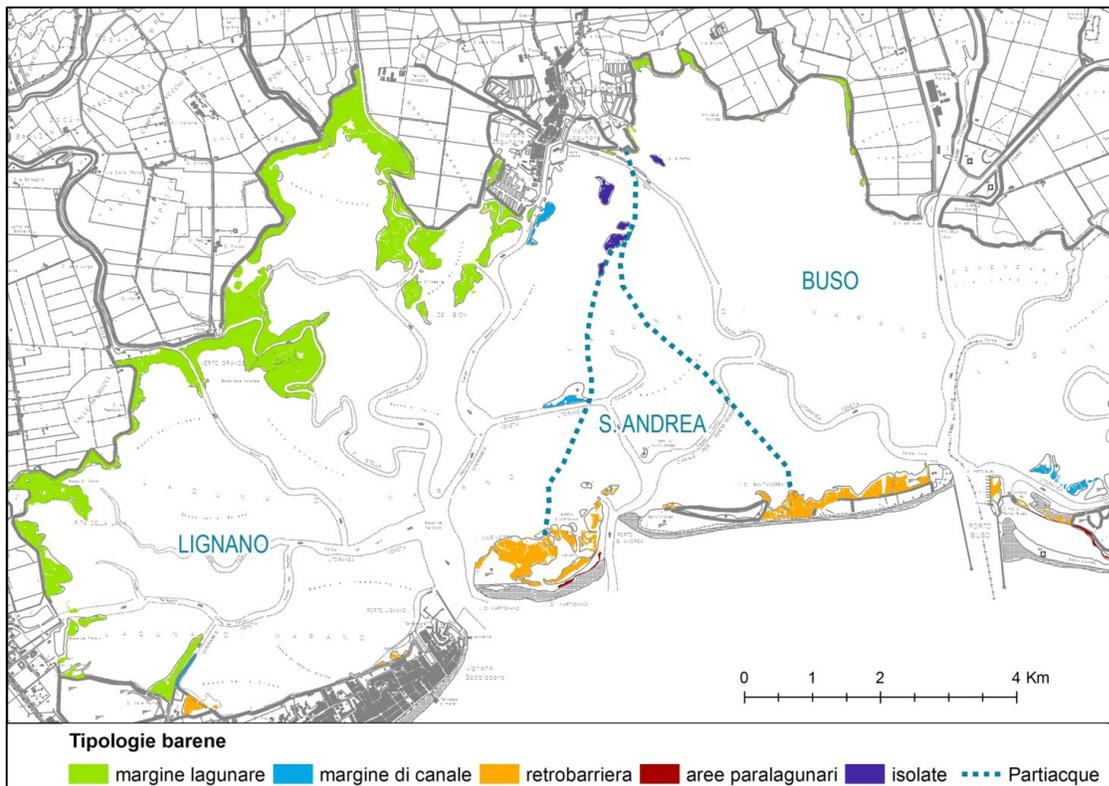


Figura 4.86. Distribuzione delle diverse tipologie di barene (da Fontolan et al., 2012 modificato).

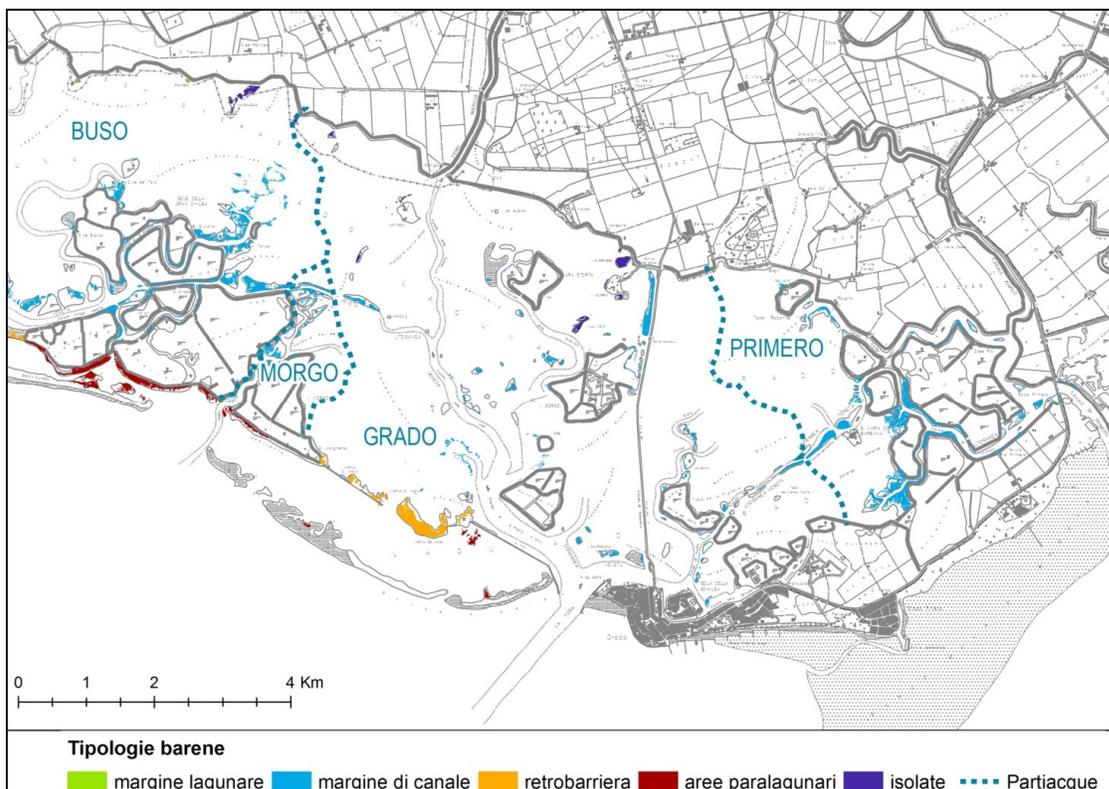


Figura 4.87. Distribuzione delle diverse tipologie di barene (da Fontolan et al., 2012 modificato).

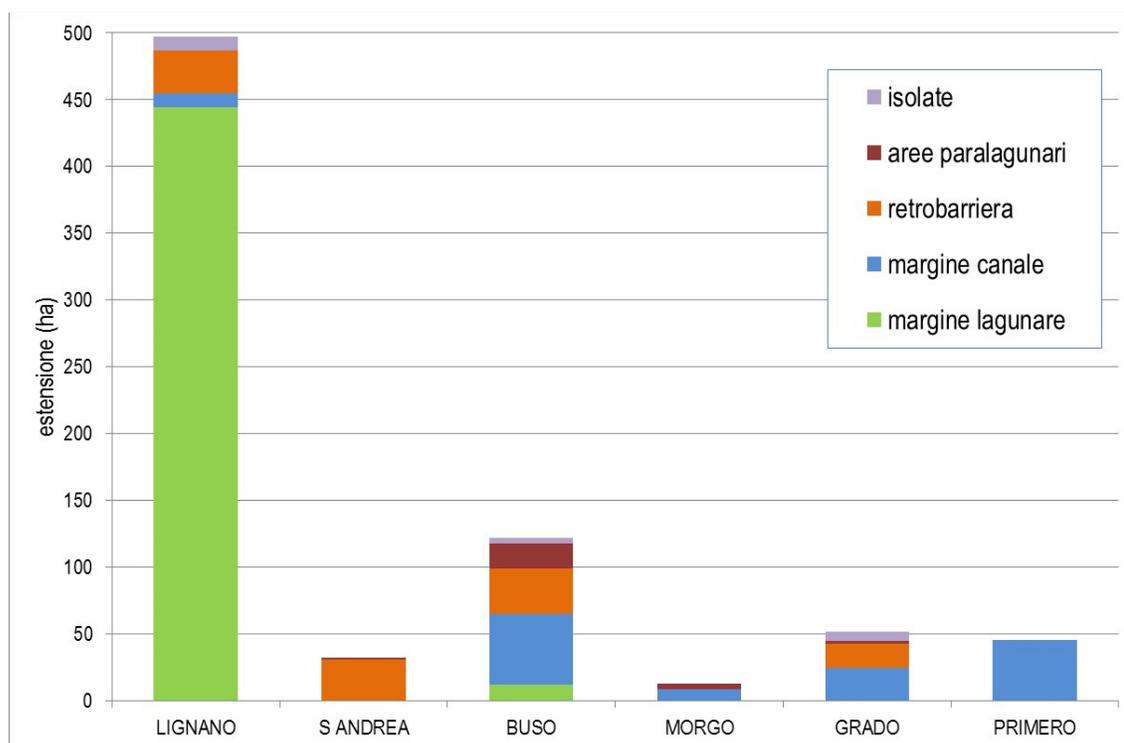


Figura 4.88. Estensione delle diverse tipologie di barene individuate suddivisa per bacino.

Le *barene di margine di canale* (estensione complessiva 142ha), già identificate a Venezia da Albani et al. (1984) e in laguna di Grado da Gatto & Marocco (1992) si formano in seguito ai processi di sedimentazione che avvengono ai lati dei canali lagunari a causa del contrasto morfologico e quindi idrodinamico tra il canale stesso e la piana adiacente. Si tratta in genere di corpi allungati lungo il bordo dei canali, dove rappresentano la parte più elevata di estese strutture intertidali, solcate da canali che si dipartono da quello principale con disegno dendritico, a volte meandriforme. I margini sul lato del canale sono spesso leggermente sopraelevati, mentre la barena alle spalle tende a digradare dolcemente verso i fondali a velma.

In alcuni casi le barene di margine canale sono di origine artificiale, formate in seguito alla pratica di escavo dei canali con riporto del sedimento sul bordo e successivamente evolutesi grazie ai processi naturali. Molte di queste barene, soprattutto lungo i canali navigabili di Grado e Primero, sono oggi ridotte a lembi, in altri casi sono difese sul lato canale da massicciate e spesso piantumate a tamerici, in alcuni casi si sono mantenute nel tempo e vi sono presenti habitat di interesse comunitario (Bezzi et al., 2015).

Le *barene di retrobarriera* (estensione complessiva 114ha) sono presenti alle spalle delle isole barriera di Martignano e Sant'Andrea, nei bacini di Lignano, Sant'Andrea e Buso, e Marina di Macia e Manzi in quello di Grado. Sono tipicamente associate alle aree di bassa piattaforma poste alle spalle di morfologie di spiaggia o in corrispondenza di aree depresse limitate da cordoni sabbiosi abbandonati ascrivibili a morfologie relitte di bocca tidale, banchi o delta di washover. Queste barene, di frequente matrice sabbiosa mostrano in genere morfologie "mature" con ghebi anche piuttosto incisi, a struttura dendritica e meandreggiante. I margini sul lato laguna in genere si raccordano dolcemente verso la velma adiacente, anche se a volte è presente un rialzo morfologico poco pronunciato. La parte interna si presenta spesso depressa con estesi chiari.

Le *barene in bacini paralagunari di recente formazione* (estensione complessiva 27ha) sono di fatto barene di retrobarriera che si è deciso, nel caso specifico, di inserire in una categoria a sè stante. Sono



le barene che si sono formate e in tempi recenti negli specchi acquei racchiusi tra i banchi esterni e le vecchie isole barriera nel bacino di Buso, Morgo e Grado. Presentano morfologie poco evolute.

Le *barene isolate* (estensione complessiva 21ha) costituiscono l'insieme di uelle barene che non mostrano una relazione evidente con altre morfologie lagunari attuali e che in alcuni casi sono legate a morfologie ereditate dall'antica pianura alluvionale (Gatto & Marocco, 1992). Dal punto di vista morfologico presentano una certa variabilità: in alcuni casi bordano piccole aree nettamente emerse di evidente origine relitta, in altri presentano morfologia tabulare fittamente solcata da ghebi meandriciformi e chiari di origine secondaria.

#### Quota delle barene

Definire una quota per le barene è una questione importante sia dal punto di vista conoscitivo / scientifico che gestionale. I rilievi topografici realizzati sul terreno, difficili e dispendiosi in termini di tempo a causa delle difficoltà logistiche, necessitano di utilizzare riferimenti, ossia caposaldi, affidabili e aggiornati. La RAFVG possiede una rete di capisaldi realizzata nella bassa pianura e in laguna nel periodo 1987-1990 per monitorare la subsidenza (Figura 4.89). La rete è costituita di 93 capisaldi situati nella pianura a nord della laguna e sugli argini interni ed esterni della laguna (Liberio, 1990). I capisaldi sono stati oggetto di un monitoraggio successivo effettuato in due fasi, 2004 e 2007, nell'ambito di uno studio commissionato dalla Protezione Civile della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (2005, 2010). Tuttavia si riscontrano alcune problematiche: l'ultima livellazione di precisione è di quasi dieci anni fa, troppi in un territorio soggetto a subsidenza come la laguna; in secondo luogo alcune verifiche successive al 2007 hanno evidenziato incertezze sul livello di riferimento su cui sono state livellate le quote dei capisaldi. Sarebbe pertanto opportuna una ripetizione della livellazione dei capisaldi, con riferimento al datum IGM42, poiché anche pochi centimetri di incertezza possono inficiare la validità di una quotatura di morfologie come le barene.

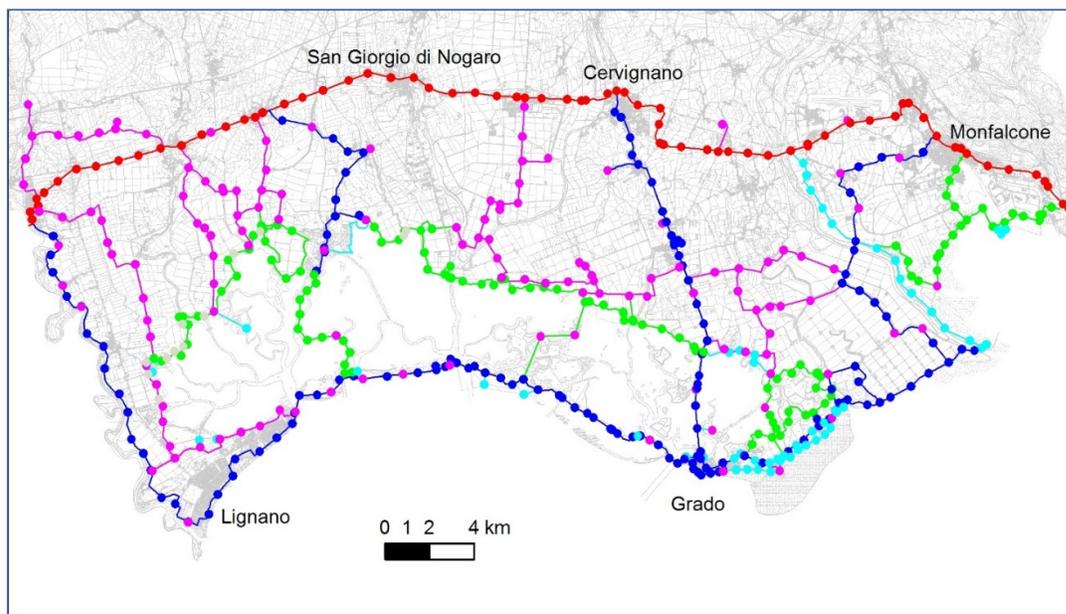
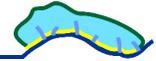


Figura 4.89. Rete di capisaldi e linee di livellazione della Bassa Pianura Friulana (Protezione Civile RAFVG, 2005).

Una prima valutazione delle quote delle barene può, allo stato attuale, essere ricavata utilizzando i dati Lidar della Protezione Civile regionale riferiti al 2008. Considerando i perimetri delle barene secondo la fotointerpretazione delle foto aeree del 2006 al loro interno sono compresi 7.560.319 punti (pixel di 1x1m)



la cui distribuzione rispetto a intervalli di quota di 10 cm è rappresentata nel grafico di Figura 4.90. I parametri statistici della distribuzione sono: min = -0.9600m, max = 4.34m, media = 0.44m, deviazione standard (d.s.)=0.31m, classe modale 0.3 – 0.4 m. Le quote delle barene che rientrano nell'intervallo statistico  $\pm d.s.$  sono quindi comprese tra 0.13 e 0.57m sul l.m.m.

All'interno della distribuzione possono essere distinte:

-Quote al di sotto dei -0.60 m: si tratta di una minima parte (294 mq) di superfici che sono state erose nell'intervallo di tempo 2006-2008 lungo bordi di canali oppure di piccole imprecisioni di digitalizzazione

-Quote comprese tra -0.60 m e +0.10 m: vi sono compresi 609990 mq, costituiti in prevalenza da bordi digradanti di barene verso la velma, sistemi di chiari, superfici o bordi erosi nell'intervallo di tempo 2006-2008, piccole imprecisioni di digitalizzazione

-Quote comprese tra +0.10 e +0.60 m: comprende la gran parte delle aree riconosciute in foto aerea e quindi digitalizzate come barene (5201475 mq).

-Quote maggiori di +0.60 m: comprendono 1748560 mq costituiti da differenti tipologie. Si tratta di (a) aree a barena collocate nelle aree di delta endolagunare (soprattutto foci dello Stella ) con prevalenza di fragmiteto (in buona misura entro la quota di 1 m ); (b) cordoni sabbiosi relitti ossia originatisi nel passato grazie alle dinamiche costiere (si veda paragrafo riferito alle isole barriera) e successivamente rimasti relegati in posizione arretrata rispetto agli attuali isole barriera; sono spesso contornati da barene a quota inferiore; (c) porzioni di barena di parziale origine artificiale ormai naturalizzate, originate da riporti di sedimento ai bordi dei canali navigabili o presso aree di valli da pesca oggi abbandonate; (d) isole all'interno dell'area lagunare costituite da alti morfologici la cui origine è probabilmente antecedente alla formazione della laguna stessa.

È necessario precisare che il dato Lidar, secondo quanto dichiarato dalla Protezione Civile Regionale non è stato sottoposto a collaudo e pertanto, anche in questo caso vi sono dei margini di incertezza.

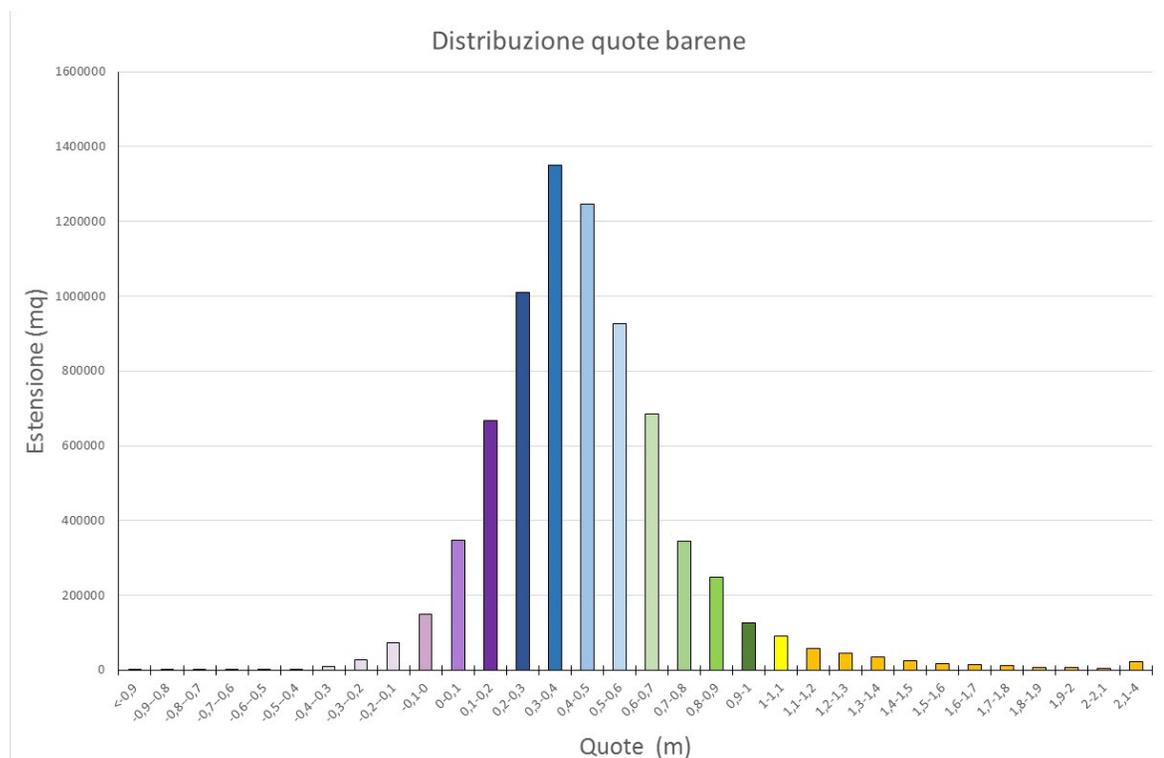
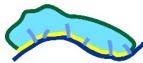


Figura 4.90. Distribuzione delle quote delle barene secondo i dati Lidar della Protezione Civile regionale riferiti al 2008.



#### 4.7.3. Stato di conservazione

I risultati ottenuti dalle analisi descritte al paragrafo 4.7.1 hanno permesso di verificare per l'intera laguna una perdita di superficie a barene pari a 144 ha, che corrispondono al 16% delle barene presenti nel 1954). Questa perdita è in realtà il risultato di una sommatoria di variazioni di segno opposto ben più rilevanti e che in gran parte si sono compensate a vicenda. Si conferma così che le barene sono soggette nel tempo a variazioni anche vistose, che necessitano però di essere interpretate correttamente.

##### *Tipologie erosivo / deposizionali e cause delle modificazioni*

Per le barene, nell'ambito della già citata collaborazione tra DMG e ARPA FVG (Covelli et al. 2013), è stata elaborata e applicata una classificazione morfoevolutiva che identifica differenti tipologie erosivo - accrescitive: 5 erosive (E1 annegamento, E2 moto ondoso da vento, E3 moto ondoso da natanti, E4 processi costieri, E5 interventi antropici diretti) e 5 accrescitive (A1 apporto fluviale, A2 apporto lagunare, A3 processi dei bacini paralagunari recenti, A4 abbandono di valli da pesca, A5 apporto di sedimenti derivati da dragaggio).

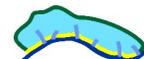
A ciascuna delle aree individuate, grazie all'analisi in G.I.S., come perse o guadagnate nei due periodi di tempo considerati (1954-1990 e 1990-2009) è stata attribuita una delle suddette categorie. Tale attribuzione è stata effettuata sulla base di elementi desumibili dai dati a disposizione: evidenze geomorfologiche relative ai margini della barena sia in pianta che in sezione, collocazione dell'area erosiva e deposizionale rispetto al complesso morfologico della barena, elementi legati al contesto geografico e fisiografico che possono essere considerati degli indicatori dei processi erosivi e deposizionali alla base delle differenti riposte evolutive, quali: l'esposizione rispetto ai venti dominanti e fetch disponibile, la vicinanza alle sorgenti sedimentarie (foci fluviali endolagunari, bocche tidali), vicinanza di elementi legati all'attività umana (canali navigabili, manufatti, valli da pesca), posizione delle barene rispetto alle altre morfologie lagunari (canali, velme).

Ne è risultato che il fenomeno più rilevante è stato la perdita di barene per interventi antropici diretti (bonifiche, escavo di canali, modifiche e ampliamenti delle valli da pesca), che ha determinato la perdita di ben 148 ha nel primo periodo (1954-1990) e 27 ha nel secondo (1990-2006) (Tabella 4.10).

Tra i fenomeni "naturali" il fenomeno erosivo che si è manifestato con rilevanza maggiore sull'intero intervallo di tempo è l'annegamento (categoria E1 con -181 ha). Seguono con uguale rilevanza le perdite attribuite all'erosione causata dal moto ondoso da natanti (E3 con -53 ha) e dal moto ondoso da vento (E2 con -53 ha), che beneficia, soprattutto a Lignano e Buso, della presenza di ampi specchi acquei liberi e viene enfatizzato dall'aumento di battente d'acqua dovuto all'innalzamento relativo del livello del mare. Molte di queste perdite sono state compensate da accrescimenti che si sono esplicitati grazie all'apporto delle correnti tidali in aree localizzate (categoria A2 con 137 ha) e a quello fluviale (categoria A1 con +95 ha), accanto alla formazione di barene nelle aree paralagunari associate ai banchi esterni e alle isole barriera (A3 con +53 ha) e in aree vallive abbandonate (A4 con +27 ha) e infine per riporto di sedimenti dragati (A5 con +8 ha).

Una volta eliminati dal computo gli interventi antropici diretti e effettuate le compensazioni tra aree guadagnate e aree perse, l'evoluzione delle barene mostra quindi un bilancio nettamente positivo per il primo periodo (+37 ha) e negativo per il secondo (-15 ha), almeno a scala di intera laguna, bilanci che si mostrano però molto diversi tra loro se si considerano i singoli bacini che costituiscono la laguna.

In particolare, per i bacini di Lignano e Buso, caratterizzati nel primo periodo da un trend accrescitivo (soprattutto nel primo caso), si è verificata un'inversione di tendenza nel secondo. Sant'Andrea e Grado confermano invece una tendenza erosiva per entrambi i periodi. Inversa invece la situazione del bacino di Primero che passa da un trend negativo a uno positivo; da ultimo il piccolo bacino di Morgo conferma per entrambi i periodi una tendenza all'aumento delle superfici.



Nel complesso per l'intera laguna si denota un'inversione di tendenza che porta a un trend complessivamente negativo per il periodo più recente. In questo aspetto gioca un ruolo cruciale il bacino di Lignano che sembra aver esaurito almeno in parte la sua tendenza alla costruzione di nuove barene che, nel primo intervallo temporale, era molto probabilmente diretta conseguenza dei riadattamenti della laguna ai grandi interventi di bonifica effettuati negli anni immediatamente precedenti. Gli apporti fluviali sembrano comunque tuttora in grado di mantenere il sistema a barene (l'erosione complessiva è pari al solo 0.6% della superficie).

Tabella 4.10. Tabella di sintesi che riporta le variazioni di estensione delle superfici per i tre intervalli di tempo e per ciascun bacino (da Bezzi, 2013)

CATEGORIA	1954-1990						
	LIGNANO	S.ANDREA	BUSO	MORGO	GRADO	PRIMERO	INTERA LAGUNA
E5	-38.16	-31.81	-50.11	-1.24	-14.50	-12.01	-147.81
A5	1.70	0.00	0.72	0.00	4.70	0.28	7.40
E1	-31.41	-11.25	-24.51	-1.28	-43.41	-9.60	-121.45
E2	-24.55	-1.43	-2.67	0.00	-8.66	-0.48	-37.79
E3	-7.18	0.00	-10.33	-1.85	-16.07	-9.47	-44.90
E4	0.00	-1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.02
A1	70.32	0.00	6.51	0.00	0.00	0.00	76.83
A2	40.32	4.58	19.17	2.82	17.01	15.15	99.05
A3	19.07	6.61	13.20	2.08	3.90	0.00	44.86
A4	0.00	0.00	14.89	3.23	2.01	1.27	21.41
<b>TOT</b>	<b>30.11</b>	<b>-34.31</b>	<b>-33.12</b>	<b>3.77</b>	<b>-55.02</b>	<b>-14.85</b>	<b>-103.42</b>
<b>TOT senza interventi antropici</b>	<b>66.57</b>	<b>-2.51</b>	<b>16.27</b>	<b>5.00</b>	<b>-45.22</b>	<b>-3.12</b>	<b>36.99</b>
	1990-2006						
E5	-19.71	-0.43	-4.25	-0.45	-0.63	-1.13	-26.61
A5	0.81	0.00	0.01	0.00	0.12	0.00	0.94
E1	-17.78	-9.20	-15.53	-2.21	-10.25	-4.43	-59.39
E2	-10.29	-0.30	-2.06	0.00	-2.27	-0.09	-15.01
E3	-3.91	0.00	-0.89	-0.60	-1.46	-1.49	-8.35
E4	0.00	-2.19	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.19
A1	16.53	0.00	2.03	0.00	0.00	0.00	18.55
A2	12.28	3.03	4.82	1.94	5.44	10.78	38.29
A3	0.00	2.13	3.44	1.81	0.36	0.00	7.74
A4	0.00	0.00	4.13	0.56	0.34	0.43	5.46
<b>TOT</b>	<b>-22.06</b>	<b>-6.96</b>	<b>-8.30</b>	<b>1.05</b>	<b>-8.37</b>	<b>4.06</b>	<b>-40.56</b>
<b>TOT senza interventi antropici</b>	<b>-3.16</b>	<b>-6.52</b>	<b>-4.05</b>	<b>1.50</b>	<b>-7.86</b>	<b>5.20</b>	<b>-14.90</b>

Le differenti tipologie erosivo – deposizionali, 5 delle quali erosive (denominate E1, E2, E2, E3 E4, E5) e 5 accrescitive denominate A1, A2, A3 A4, A5) sono descritte di seguito (da Covelli et al., 2013).

**Modifiche naturali o antropiche indotte**

A1	
	<i>Stile evolutivo:</i>
	<b>neoformazione di barene, ampliamento di barene esistenti in aree di gronda lagunare</b>
	<i>Forzante:</i>
	<b>input fluviale</b>
	<i>Descrizione:</i> Tipico delle aree di gronda lagunare o di delta endolagunare. L'accrescimento avviene grazie agli apporti fluviali dal bacino scolante che vanno ad alimentare le aree più protette e prossime al margine lagunare. Si osserva l'ampliamento delle barene soprattutto in corrispondenza di baie e/o insenature protette e l'espansione della vegetazione tipica di ambienti dulcicoli o salmastri, la cui elevata produttività può contribuire in modo significativo ad aumentare il fenomeno accrezionale.
A2	
	<i>Stile evolutivo:</i>
	<b>neoformazione di barene, ampliamento di barene esistenti</b>
	<i>Forzante:</i>
	<b>input mareale</b>
	<i>Descrizione:</i> Determinato dall'apporto di sedimento da parte delle correnti di marea. La sedimentazione avviene laddove le correnti tidali ricche di sedimento perdono velocità e quindi competenza: nelle barene di margine di canale sul lato di raccordo con la velma, alle biforcazioni dei canali di marea o presso brusche variazioni nella loro orientazione, dove i flussi fuoriescono dai canali in aree di espansione laterale (con strutture simili a ventagli deltizi). I margini coinvolti si presentano progradanti a debole pendenza.
A3	
	<i>Stile evolutivo:</i>
	<b>neoformazione di barene</b>
	<i>Forzante:</i>
	<b>formazione di specchi d'acqua paralagunari protetti</b>
	<i>Descrizione:</i> La vivace dinamica sedimentaria costiera dei sistemi a isola barriera che bordano la laguna verso mare ha determinato in tempi recenti la formazione di estesi banchi sabbiosi emersi, caratterizzati dalla tipica vegetazione di spiaggia. Tra essi e le isola barriera originarie si sono così formati degli specchi acquei protetti a carattere paralagunare. In questo contesto si assiste localmente all'instaurarsi di processi di sedimentazione di materiali fini o misti con formazione di nuove aree a barena.



<b>A4</b>	
	<p><i>Stile evolutivo:</i>  <b>neoformazione e ampliamento di barene esistenti in aree un tempo arginate</b></p> <p><i>Forzante:</i>  <b>input mareale in aree protette</b></p> <p><i>Descrizione:</i>                  Questo fenomeno avviene in seguito alla riapertura di vecchie valli da pesca dismesse, che una volta riaperte al flusso di marea, sono tornate a far parte integrante del sistema lagunare. La presenza dei vecchi argini può favorire l'instaurarsi di regimi deposizionali determinando la formazione di nuove barene o l'ampliamento di quelle preesistenti.</p>
<b>E1</b>	
	<p><i>Stile evolutivo:</i>  <b>annegamento</b></p> <p><i>Forzante:</i>  <b>subsidenza / deficit sedimentario</b></p> <p><i>Descrizione:</i>                  Risultato dell'azione combinata di eustatismo, subsidenza regionale e auto-compattazione in presenza di scarsa sedimentazione, si traduce in un processo di annegamento localizzato o esteso. Il fenomeno interessa soprattutto le barene di retrobarriera e di margine di canale. Evidenze morfologiche: arretramento dei margini sul lato di raccordo con la velma, formazione di aree depresse nelle aree più interne, approfondimento o ampliamento di ghebi e chiari. I margini non presentano evidenti gradini di erosione.</p>
<b>E2</b>	
	<p><i>Stile evolutivo:</i>  <b>erosione dei margini / frammentazione</b></p> <p><i>Forzante:</i>  <b>moto ondoso</b></p> <p><i>Descrizione:</i>                  Si riscontra sui margini delle barene esposte ad ampi tratti di acque libere, nella direzione di provenienza dei venti dominanti. Il moto ondoso produce l'arretramento dei margini con formazione di scarpate erosive e/o fenomeni di sovraescavazione e scalzamento alla base. In pianta appare evidente un'evoluzione asimmetrica, con arretramento solo sul lato esposto al vento, spesso con una tipica alternanza di baie e promontori. Nei casi più gravi si produce la frammentazione delle barene e la scomparsa dei corpi di minori dimensioni.</p>

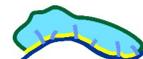


<b>E3</b>	
	<p><i>Stile evolutivo:</i></p> <p><b>erosione dei margini / frammentazione</b></p> <p><i>Forzante:</i></p> <p><b>moto ondoso indotto dal transito di natanti</b></p> <p><i>Descrizione:</i></p> <p>Caratteristico delle barene situate ai lati dei canali navigabili, le quali subiscono nel corso del tempo una vistosa erosione del margine esposto al moto ondoso indotto dai natanti in transito. È un fenomeno diffuso in tutta la laguna, soprattutto lungo le principali vie di comunicazione acquee. Le manifestazioni morfologiche possono essere molti simili a quelle descritte per il caso E2 e nei casi più eclatanti portare a una notevole riduzione della barena in termini areali e alla sua frammentazione.</p>

<b>E4</b>	
	<p><i>Stile evolutivo:</i></p> <p><b>arretramento del margine / sommersione di sabbia / apertura di washover</b></p> <p><i>Forzante:</i></p> <p><b>dinamica costiera / moto ondoso</b></p> <p><i>Descrizione:</i></p> <p>Generato dai dinamismi costieri in casi di elevato trasporto lungo riva con migrazione delle bocche tidali o formazione di rotte di washover. Le modifiche dei corpi sabbiosi indotte dalla dinamica costiera possono determinare la distruzione di aree a barena soprattutto nell'ambiente di retrobarriera, attraverso progressivi o repentini eventi sia erosivi che deposizionali.</p>

**Modifiche antropiche dirette**

<b>A5</b>	
	<p><b>Incremento o creazione di barene per riporto di sedimenti dragati</b></p> <p>Azione antropica diretta che consiste nella creazione di nuove barene lungo i margini dei canali dragati, secondo una pratica tradizionalmente utilizzata in laguna. I sedimenti dragati venivano depositi lungo il margine del canale a creare accumuli in genere di forma allungata e successivamente liberi di evolvere. Alcune di esse si sono evolute in morfologie non del tutto dissimili da quelle naturali.</p>



Consiste nell'eliminazione o completa trasformazione di porzioni o di interi corpi barenali. Le pratiche e le finalità riconducibili a questa tipologia sono diverse: bonifiche, costruzione di casse di colmata, riassetto degli argini di conterminazione, ampliamento di valli da pesca.

### *Analisi per gruppi*

Partendo dallo stato di fatto nel 2006 e in base alla loro distribuzione geografica le barene sono state suddivise in gruppi, in modo da poter realizzare analisi e confronti nel dettaglio di ciascun (Fontolan et al. 2012, Covelli et al. 2013). Si sono identificati in totale 103 gruppi, la cui distribuzione è riportata in Figura 4.91 e nella Tavola 3). Essi sono stati identificati con una lettera (che indica il nome del bacino) e un numero progressivo.

Sui gruppi è stata realizzata un'analisi delle variazioni areali per il periodo 1954-1990, 1990-2006 e 1954-2006. Questo tipo di analisi consente di avere una visione del bilancio areale a scala di gruppo, di capire quali gruppi presentano tendenze erosive parziali (relative solo a uno dei due intervalli di tempo) o croniche (mantenute nei due intervalli di tempo) e di quantificarle. Consente inoltre di identificare con immediatezza i gruppi di barene che nell'intero intervallo di tempo considerato hanno perso una porzione più o meno significativa della loro superficie rispetto a quella di partenza. Questa erosione in % è rappresentata nella Tavola 3. Essa rappresenta quindi uno strumento utile quale criterio di priorità per il recupero / ripristino morfologico delle barene .

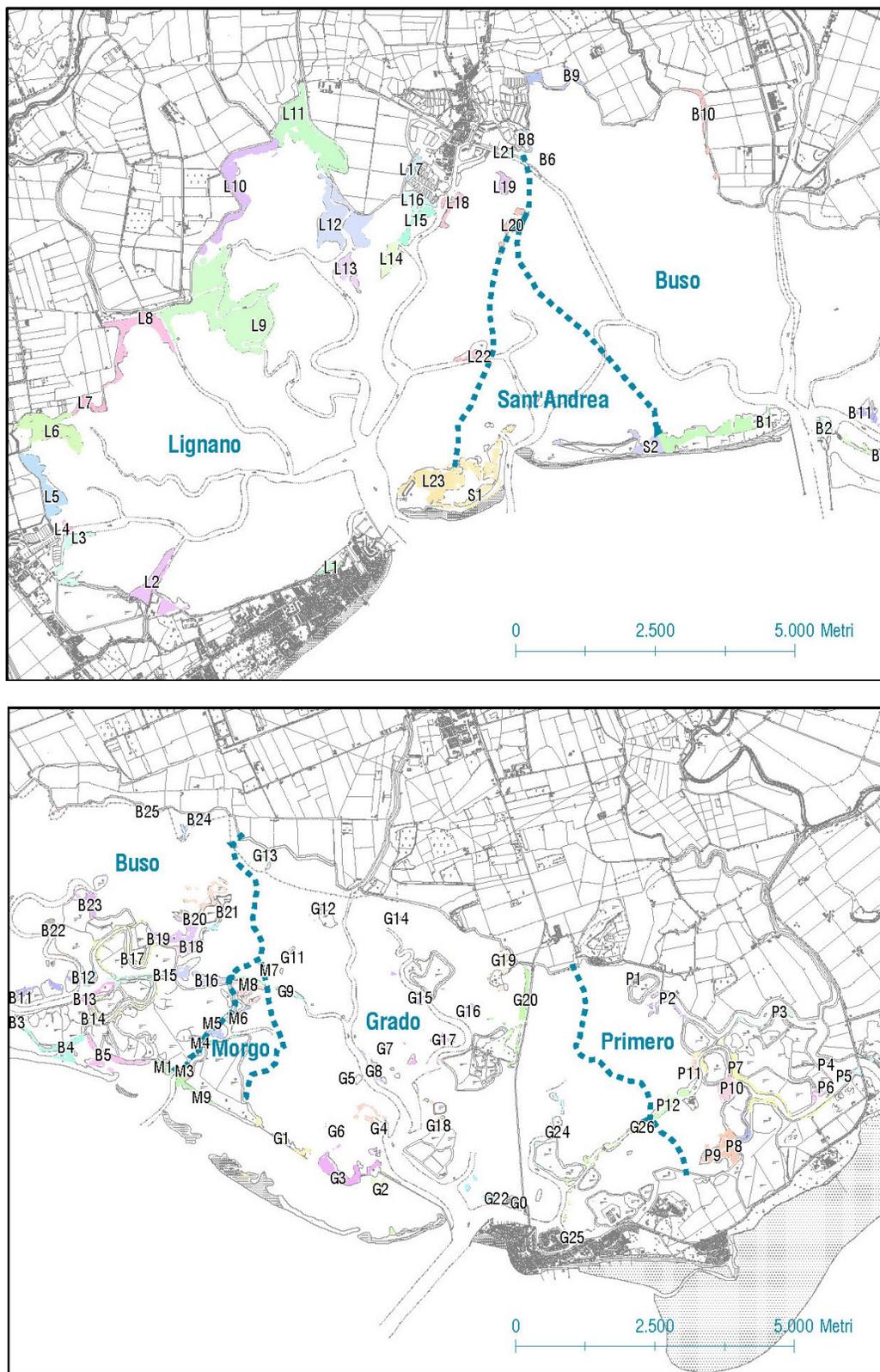
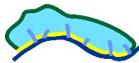
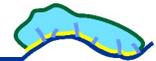


Figura 4.91. Localizzazione in laguna dei 103 gruppi di barene.



## 4.8. Piane tidali

La terminologia utilizzata per identificare e classificare i fondali lagunari non è sempre univoca nella letteratura tecnico-scientifica e viene utilizzata in maniera spesso contraddittoria a seconda dell'Autore. Le piane di marea o piane intertidali in sedimentologia vengono definite come *un ambiente in cui la sedimentazione è controllata dal flusso e dal riflusso delle maree. In sostanza le piane di marea sono sistemi deposizionali sabbioso-fangosi localizzati lungo le coste aperte o estuarili, soggette a periodi di sommersione ed emersione in funzione dell'innalzamento e dell'abbassamento delle maree* (Bates e Jackson, 1987).

La già citata classificazione di *Albani et al. (1984)* (Figura 4.2) concorda con quelle adottate da *Brambati (1988)* nell'individuare il limite inferiore del campo di esistenza delle piane tidali nel livello medio delle basse maree, alla prima si rifanno anche *Gatto & Marocco (1992)*.

In campo internazionale *Dyer (2000)* si rifà alla classificazione di *(Klein, 1985)* che individua tre zone:

- la piana di marea bassa: tra il livello medio di bassa marea di quadratura e quello di bassa marea di sizigia
- la piana di marea media: tra i livelli medi di alta e bassa marea di quadratura
- la piana di marea alta: tra il livello medio di alta marea di quadratura e quello medio di alta marea di sizigia (quest'ultimo intervallo corrisponde a quello precedentemente individuato come barena, che molti Autori effettivamente indicano come una sottoclasse di fondale lagunare).

*Flemming (2003)* a sua volta individua come carattere di primaria importanza solo la sommersione periodica da parte della marea.

All'interno di questo *Studio*, dopo attente considerazioni di carattere morfodinamico, sedimentologico ed ecologico, abbiamo scelto di individuare le piane di marea all'interno dell'intervallo compreso tra lo 0 e il livello medio delle basse maree distinguendole così dalle barene nell'intervallo superiore e dalle piane sub - tidali in quello inferiore.

In Veneto e Friuli Venezia Giulia le piane tidali (ma il termine sta ormai assumendo valenza scientifica più generale) vengono indicate con il toponimo locale di *velme*.

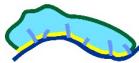
Queste morfologie risultano particolarmente complesse e sono ancora poco studiate e comprese, soprattutto a causa della frequente presenza di sedimenti fini coesivi (il cui comportamento fisico è ben più difficile da conoscere rispetto ai sedimenti non coesivi), della continua alternanza di emersione e sommersione e della stretta interazione con i fenomeni chimici e biologici. In particolare risulta ancora una incompleta comprensione della risposta delle piane tidali ai cambiamenti climatici, all'innalzamento del livello del mare e agli input antropici.

La principale peculiarità di queste morfologie ossia la continua alternanza di emersione e sommersione le rende habitat di estremo interesse e importanza, identificati come "prioritari" ai sensi della Direttiva 92/43/CEE (Habitat 1140). Il loro principale valore è legato al ruolo che giocano come siti di alimentazione dell'avifauna acquatica.

### 4.8.1. Dati e metodologia di analisi

Non esistono studi specifici realizzati in laguna di Marano e Grado, se non quelli realizzati nell'ambito del presente *Studio*.

La distribuzione delle piane tidali in laguna di Marano e Grado si può desumere dai dati batimetrici mentre non è desumibile dalle foto aeree, mancando di una morfologia univocamente riconoscibile (a differenza delle barene). Per identificarle all'interno delle due batimetrie esistenti (1964 e 2009) il primo passo è quello di definire le quote caratteristiche della fascia intertidale, ricavandole dai dati mareografici. Nel nostro caso è stato individuato l'intervallo di quota tra 0 e -0.6 m; la quota inferiore è stata determinata, quale quota media delle basse maree sizigiali, analizzando la distribuzione media delle maree registrata



dal mareografo di Grado dal 1991 al 2014 e quella di Trieste dal 1891 al 2014. La scelta di riferirsi al livello delle basse maree sizigiali tiene conto anche dell'intervallo di tempo che si va a considerare (1964-2009), intervallo entro il quale si è verificato un innalzamento del livello del mare quantificato al paragrafo 4.2.6.

#### 4.8.2. Stato di fatto

In base alla batimetria del 2009 la distribuzione delle velme (considerando l'intervallo batimetrico 0 - -0.6 m) per l'intera laguna è riportata in Figura 4.92 e corrisponde a un'estensione di 3152 ha. La scheda del S.I.C. riporta un'estensione di 1600 ha per l'habitat 1140, questa incongruenza dei due dati è difficile da interpretare mancando informazioni sulla tecnica con cui è stata determinata l'estensione dell'habitat. Un ridimensionamento dell'estensione da noi conteggiata si otterrebbe riducendo l'intervallo di profondità di riferimento.

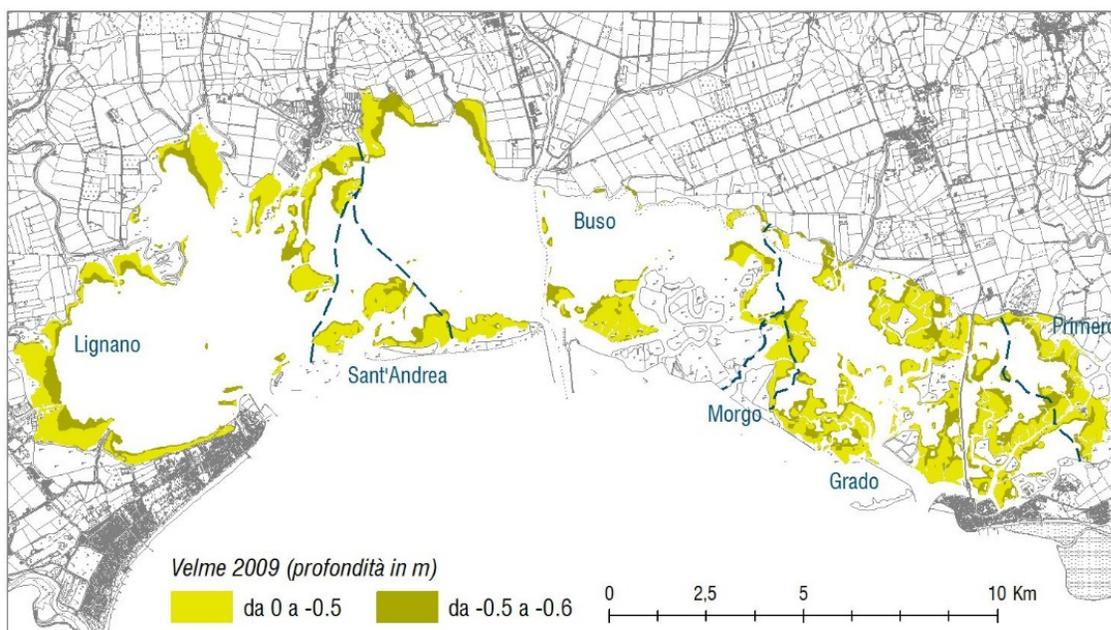
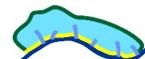


Figura 4.92. Distribuzione delle velme in laguna secondo i dati della batimetria 2009 e considerando gli intervalli di quota compreso tra 0 e -0.50m e tra -0.50m e -0.60, rispetto al l.m.m. IGM 42.

Come si può vedere in laguna di Marano le velme sono situate soprattutto lungo i bordi interni della laguna e alle spalle delle isole barriera, mentre in laguna di Grado sono più diffuse e legate ai grandi sistemi morfologici costituiti da barene e canali (Figura 4.93 e Figura 4.94).

È necessario precisare che l'estensione delle velme in base alla batimetria del 2009 va considerata in parte sottostimata. Infatti la carta batimetrica presenta delle "aree non rilevate" che sono frequentemente aree con scarso battente d'acqua, che proprio per questo hanno determinato difficoltà nell'acquisizione del dato batimetrico.

Si tratta in genere di aree a prevalente sedimentazione fine, anche se non mancano casi caratterizzati da sedimento sabbioso; su di esse di norma non è presente una copertura vegetale da parte di fanerogame marine se non limitata alle specie che tollerano meglio una parziale emersione, a questo proposito a titolo di esempio in Figura 4.95 è riportata la distribuzione delle profondità e della copertura a fanerogame per



il bacino di B e nel grafico di Figura 4.96 è rappresentata la distribuzione delle superfici coperte da fanerogame (secondo la mappatura realizzata nel 2010 da Boscutti et al., 2012 ) rispetto alle differenti classi di profondità .



Figura 4.93. Esempio di piane di marea (campite in arancione) che si sviluppano sui margini lagunari in bacino di Lignano.

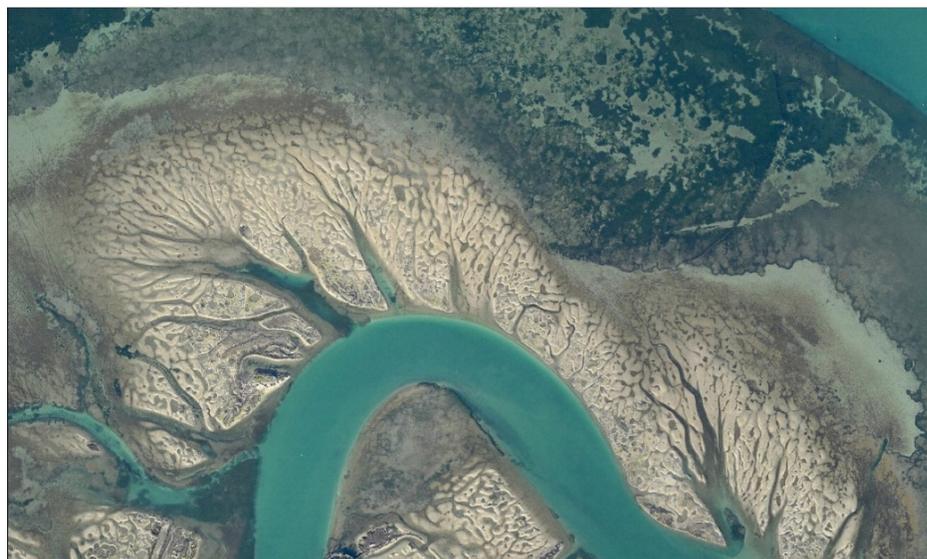


Figura 4.94. Esempio di piane di marea ai lati del canale di Bacan in bacino di Grado.

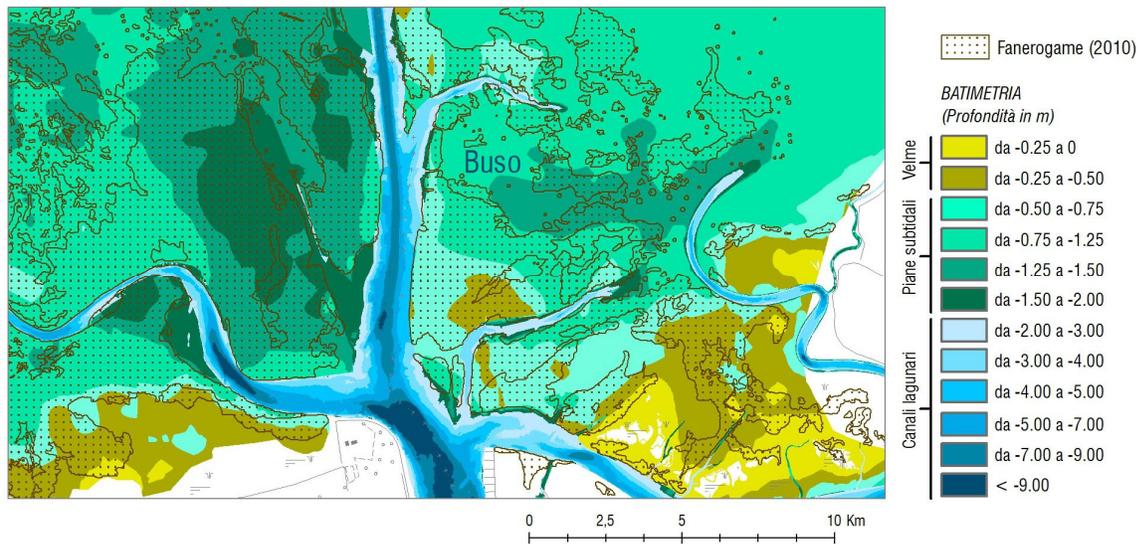
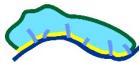


Figura 4.95. Mappa del bacino di Buso con la distribuzione delle profondità (2009) e la mappatura delle fanerogame marine (2010).

Le velme sono di frequente solcate da un sistema di canali secondari che affluiscono ai canali principali. Si tratta di canali meandreggianti con un livello di base che coincide con quello medio di bassa marea (Brambati et. al., 1988) e che assolvono al compito di drenare e disperdere le acque all'interno del bacino lagunare. Le velme rappresentano spesso una superficie di graduale raccordo con la barena, anche se in molti casi il passaggio velma / barena è rappresentato da un netto gradino morfologico. In entrambe le lagune, ma soprattutto in quella di Marano, esistono poi estese aree di **fondale subtidale**, ossia posto al di sotto del livello della bassa marea, queste aree laddove presentino un battente d'acqua compreso tra 1 e 2 m sono state chiamate anche *paludi* (Gatto & Marocco, 1992).

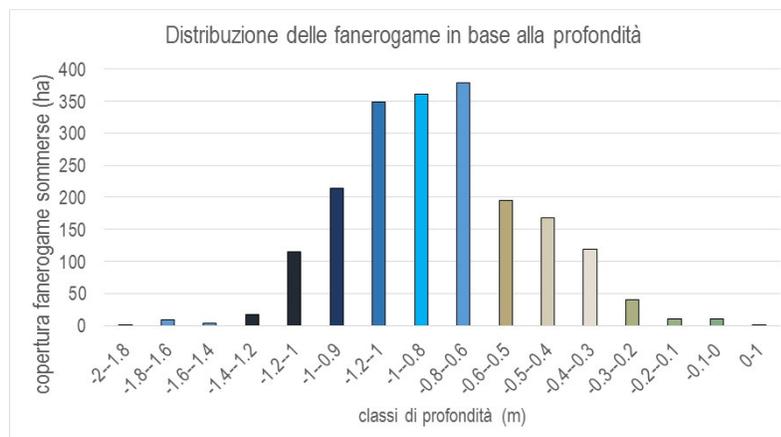
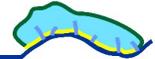


Figura 4.96. Distribuzione delle fanerogame rispetto alle classi di profondità.

#### 4.8.3. Stato di conservazione

Le velme, a differenza delle barene, non sono sempre rappresentate da una morfologia ben definita ed è pertanto difficile avere un'evidenza del loro stato di qualità dal punto di vista geomorfologico. La loro evoluzione è il risultato dei fenomeni di erosione, trasporto e sedimentazione a opera delle correnti tidali durante il flusso e riflusso della marea o dell'azione delle onde durante gli eventi di vento. Dal punto di



vista fisico sono le aree della laguna maggiormente soggette alle sollecitazioni erosive da parte dell'azione combinata delle correnti di marea e del moto ondoso. Una serie di studi basati sulla distribuzione ipsometrica della laguna di Venezia e su simulazioni da modello (Fagherazzi et al., 2006; Defina et al., 2007; Fagherazzi et al. 2007; Carniello et al., 2009) attribuiscono alle quote che le caratterizzano un elevato grado di instabilità legato proprio alla maggior efficienza erosiva del moto ondoso. Va tuttavia precisato che tali studi mostrano una certa imprecisione nell'utilizzo della terminologia morfologica e nelle quote di riferimento.

La risospensione dei sedimenti sulle piane di marea può avvenire a causa del moto ondoso sia naturale che da natante, ma anche delle attività di pesca ai molluschi con mezzi meccanici. Il sedimento, una volta portato in sospensione nella colonna d'acqua, può sedimentare all'interno dei canali determinandone il progressivo interrimento o essere trasportato verso il mare attraverso le bocche lagunari, contribuendo al deficit sedimentario della laguna nel suo complesso.

Grazie alle due batimetrie lagunari disponibili è possibile avere un'idea della tendenza evolutiva in atto e quindi capire se si tratta di morfologie in declino sia in termini generali che localizzati geograficamente.

La Figura 4.97 mostra la distribuzione delle velme in base alla batimetria del 1964: la loro estensione era pari a 5824 ha e comprendeva molte aree a ridosso dei margini lagunari soprattutto in laguna di Marano, una vasta area collocata alle spalle dell'isola barriera di Martignano e che si estendeva fin quasi a Marano Lagunare, un'estesa porzione dei fondali posti sul retrobarriera dell'isola di Sant'Andrea e la maggior parte dei fondali della laguna di Grado.

Dal confronto con il dato del 2009 realizzato nell'ambito dello Studio risulta una perdita di 2672 ha, pari al 45.9 % dell'estensione complessiva nel 1966. La forte riduzione di questa classe di fondali, identificabile già ad un primo semplice confronto visivo, appare pressoché generalizzata sull'intera laguna. Fanno eccezione alcune aree della laguna di Marano, soprattutto a ridosso del margine occidentale e nella secca di Muzzana, dove si assiste a un ampliamento delle superfici ascrivibili alla categoria velme.

Un altro aspetto delle modificazioni cui possono andare incontro queste aree è la perdita di canali secondari; pur evidente in alcuni ambiti, questo aspetto richiederebbe ulteriori indagini per essere quantificato nella sua reale entità e compreso nelle sue dinamiche.

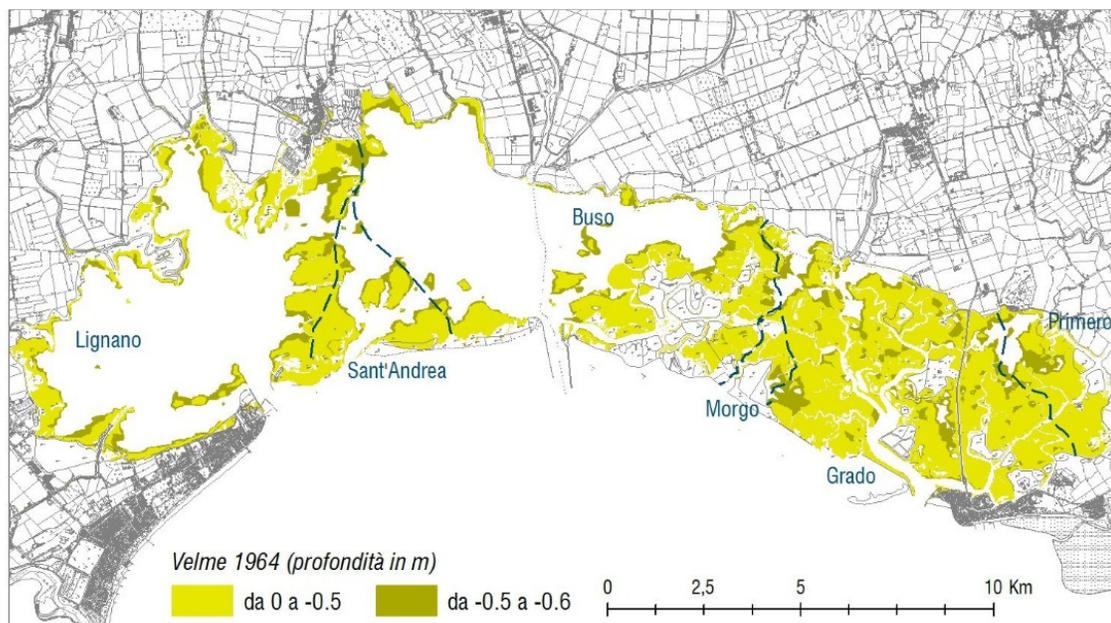


Figura 4.97. Distribuzione delle velme in laguna secondo i dati della batimetria del Dorigo.



## 4.9. Canali

Secondo uno schema “classico” di una laguna i punti nodali del reticolo idrografico sono le bocche lagunari a partire dalle quali si dirama una complessa rete di canali che afferiscono alle stesse. Un aspetto tipico di questi reticoli è lo sviluppo dendritico similmente a quanto accade con i reticoli fluviali; la sua forma e gerarchia è però in genere più difficile da inquadrare e schematizzare soprattutto, come nel caso della nostra laguna, a causa della commistione con eventuali sistemi fluviali che dall’entroterra sfociano in laguna e di una serie di interventi antropici di modifica del reticolo naturale con rettificazioni, escavo di nuovi canali, collegamenti tra differenti bacini.

Dal punto di vista idrodinamico la più importante caratteristica dei canali lagunari è che svolgono il ruolo di convogliare il flusso della marea entrante e uscente. Ne consegue che il flusso all’interno degli alvei è bidirezionale e questa è la differenza principale rispetto agli alvei fluviali.

Secondo una classificazione proposta da Ashley e Zeff (1988) si possono in primo luogo identificare i canali principali che garantiscono lo scambio d’acqua tra la laguna e il mare (*ocean to lagoon – channel*) o garantiscono il collegamento con altri canali (*channel to channel*); a questa categoria Gatto & Marocco (1993), proprio in riferimento alla laguna di Grado, hanno aggiunto i canali che collegano il corso terminale dei fiumi che sfociano in laguna. Una seconda categoria può essere considerata quella costituita dai canali secondari (Ashley & Zeff, 1988; Gatto & Marocco, 1993) che si dipartono dai principali e attraverso un numero indefinito di ulteriori diramazioni si estinguono nelle velme o nelle barene.

### 4.9.1. Dati e metodologia di analisi.

L’analisi del reticolo dei canali è stata affrontata grazie al confronto cartografico già utilizzato per le velme e i fondali. La metodologia di rilievo della carta batimetrica (Triches et al., 2011) limita in parte la possibilità di censire i canali secondari: infatti mentre i canali principali sono stati rilevati con metodologia multibeam che produce un rilievo dettagliato e di alta precisione, lungo i fondali (solcati o meno da canali secondari minori) il rilievo è stato fatto lungo sezioni spaziate di 150 m. Questa spaziatura che non consente sempre di individuare i canali secondari o i ghebi caratterizzati da ridotte profondità e scarsa ampiezza.

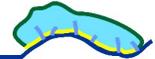
In questa sede per integrare il dato fornito dalla carta batimetrica è stata eseguita una foto-interpretazione digitalizzando il percorso dei canali non presenti nella carta ma visibili in foto aerea. Per questo lavoro sono state utilizzate le ortofoto Agea 2014 supportate per l’interpretazione dalle foto aeree precedenti citate al paragrafo 4.2.2.

### 4.9.2. Stato di fatto

In Figura 4.98 viene presentata la distribuzione dei canali allo stato attuale con evidenziati i canali di origine artificiale e le afferenze ai differenti bacini.

I canali in parte si sovrappongono agli alvei dell’antica rete fluviale che caratterizzava la paleopianura e in molti casi si raccordano alle attuali foci in laguna dei principali corsi d’acqua dolce.

I canali artificiali sono in gran parte il risultato degli escavi realizzati per la costruzione della via d’acqua litoranea veneta, tutti antecedenti agli anni ’50 mentre sono successivi gli escavi di grandi darsene in laguna con i relativi canali di collegamento. Come già evidenziato da Gatto & Marocco per la sola laguna di Grado mancano i canali di collegamento da canale a canale (*channel to channel*) anche per la laguna di Marano. Come evidente dalla mappa la distribuzione appare molto differente da bacino a bacino: in bacino di Lignano e Sant’Andrea il reticolo appare piuttosto semplificato e sono invece presenti canali che afferiscono alle foci dei corsi d’acqua dolce ma che non si collegano con quelli afferenti al mare. Nel bacino di Buso il reticolo appare differente sui due lati del canale navigabile Aussa Mare, sul lato destro



il reticolo è praticamente assente mentre appare più sviluppato su quello sinistro. Il piccolo bacino di Morgo presenta un reticolo sviluppato attorno all'unico canale principale presente. Estesi e ben sviluppati si presentano infine i reticoli dei bacini di Grado e Primero. Le aree interessate dai canali per ogni bacino idrografico sono rappresentate nel grafico di Figura 4.99.

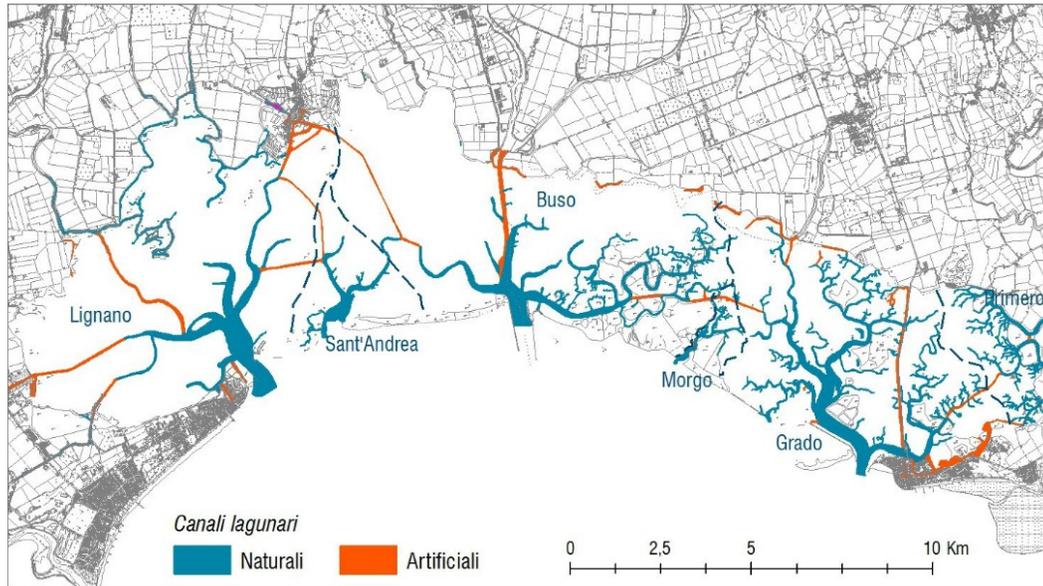


Figura 4.98. Reticolo dei canali 2009

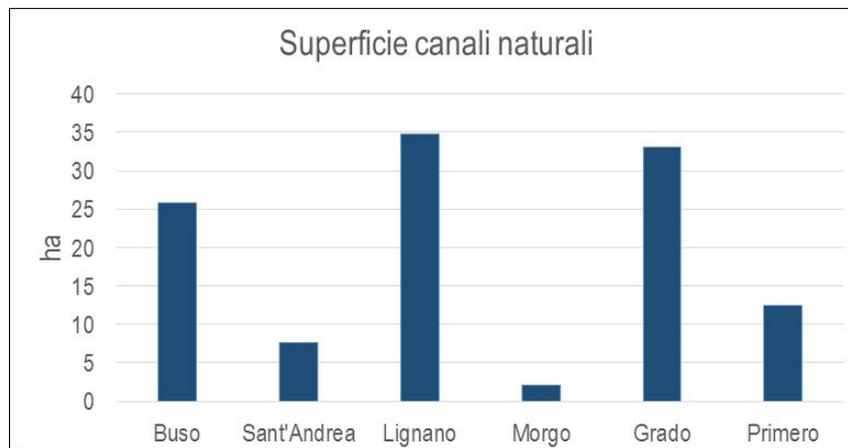


Figura 4.99. Differenti superfici occupate dai canali nei vari bacini idrografici della laguna, sono stati esclusi dal computo i canali artificiali.

#### 4.9.3. Stato di conservazione

I canali lagunari rispondono come e più delle altre morfologie lagunari alle modificazioni ambientali che avvengono sia a scala di intera laguna che a carattere più locale.

Il confronto cartografico 1964 - 2009, come già descritto al paragrafo 4.3 ha consentito di individuare una generale tendenza all'interrimento dei canali sia di quelli artificiali che di quelli naturali. In secondo luogo il risultato del lavoro di controllo e digitalizzazione dedicato nello specifico ai canali e descritto al paragrafo precedente ha dato come risultato una cartografia della distribuzione dei canali nelle due annate di riferimento che è riportata Figura 4.100 e nella Tav. 2.

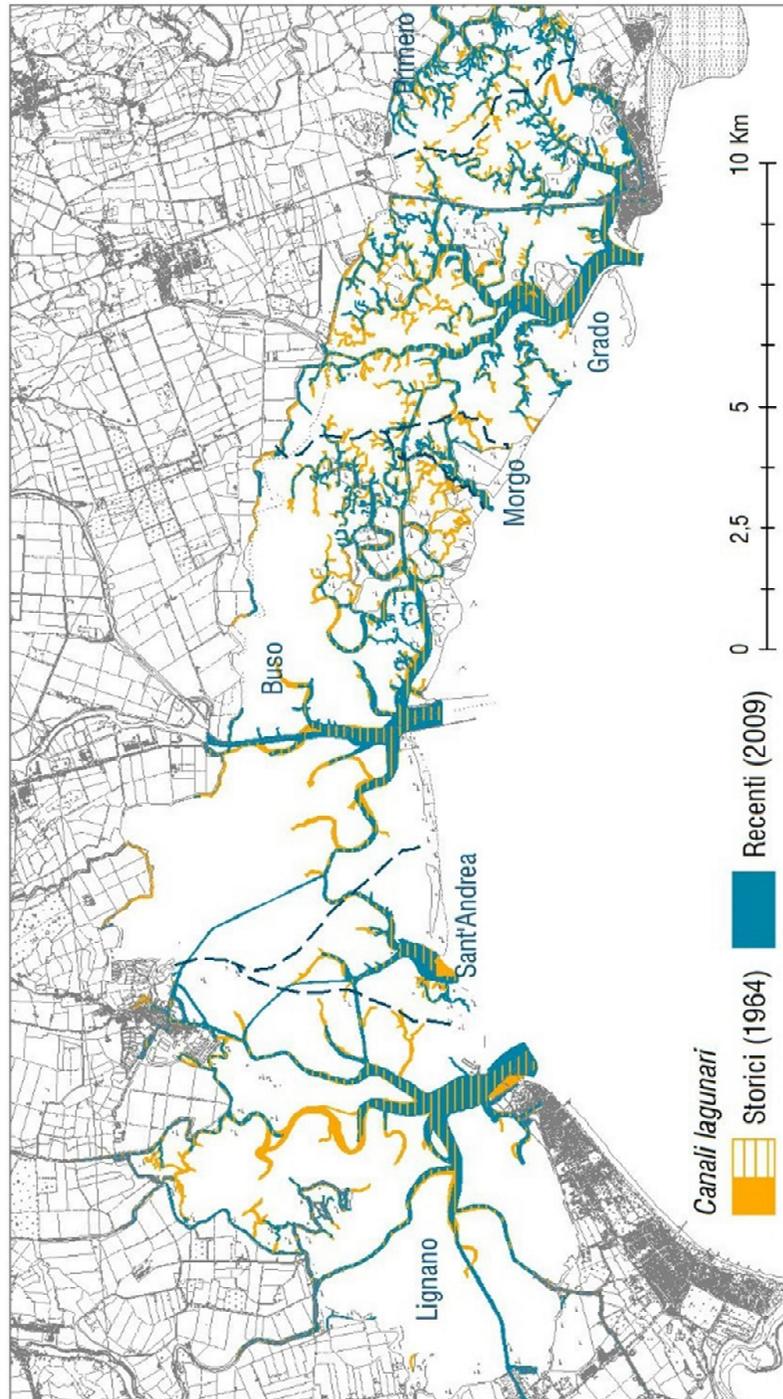


Figura 4.100. Confronto della distribuzione dei canali lagunari nelle due annate di riferimento (1964 e 2009)

La mappa evidenzia una progressiva perdita di reticolo idrografico a discapito dei canali secondari e dei ghebi, confermata dall'ipsometria rappresentata nel grafico di Figura 4.101. Nel grafico appare evidente la perdita di canali a debole profondità.

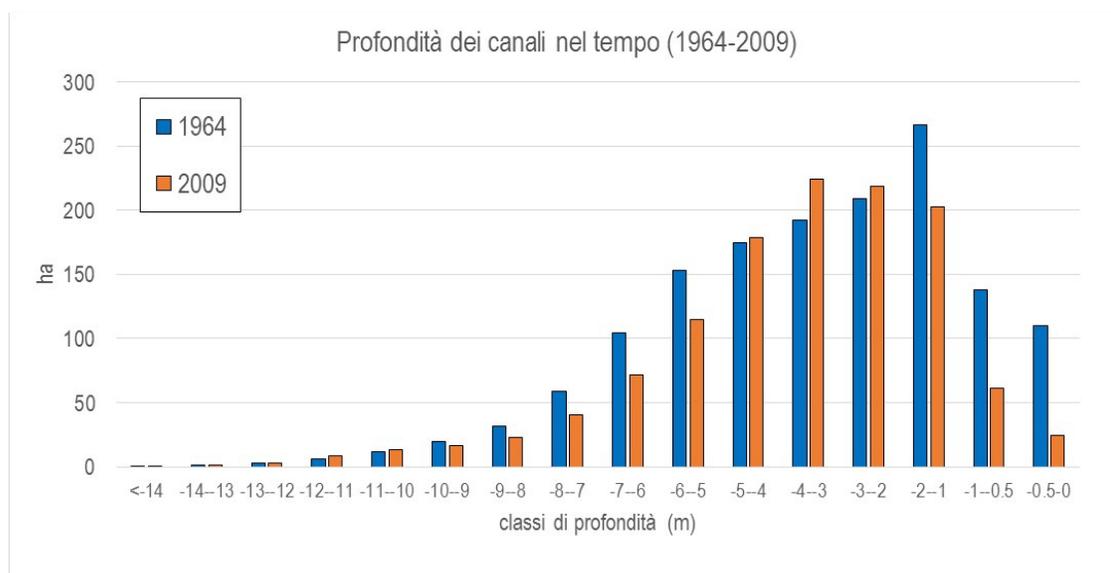


Figura 4.101. Distribuzione ipsometrica dei canali nel 1964 e nel 2009.

#### 4.10. Valli da pesca

Pur non trattandosi di morfologie naturali in senso stretto tra le componenti morfologiche della laguna di Marano e Grado vanno annoverate anche le valli da pesca, bacini arginati in cui il flusso e riflusso mareale naturale vengono impediti e /o appositamente regolati attraverso apposite chiuse. La loro presenza è un aspetto di grande rilievo per la conservazione dell'ambiente lagunare e per la valorizzazione stessa della laguna.

Pratica tradizionale diffusa da lungo tempo in laguna di Marano e Grado, attualmente le valli da pesca occupano una superficie pari a circa 1700-1800 ha (Regione FVG, 2012b). Negli ultimi decenni molte valli sono state però abbandonate per la loro scarsa sostenibilità economica e gli argini vallivi hanno spesso subito una forte erosione, con perdita e alterazione di habitat specifici e di aree utili all'avifauna. Su 43 valli da pesca presenti in laguna di Marano e Grado ben 34 non sono gestite, in alcuni casi risultano abbandonate, in altri addirittura se ne registra la scomparsa.

L'abbandono dell'ambiente vallivo determina dal punto di vista idromorfologico:

- degrado progressivo degli argini e perdita del loro valore in termini di complessità morfologica;
- assenza di gestione e manutenzione dei canali interni, con perdita di superfici emerse;
- semplificazione del regime idraulico della valle.

La difesa del valore ecologico della laguna non può prescindere dalla conservazione e dal ripristino delle stesse valli da pesca. Interventi di salvaguardia strutturale sono quanto mai necessari e urgenti e porterebbero a positive ricadute sia a livello faunistico che floristico.



#### 4.11. Descrizione geomorfologica della laguna ed evoluzione complessiva

Grazie all'analisi descritte nel presente capitolo, in particolare grazie all'analisi cartografica, aereo-fotogrammetrica e ai sopralluoghi sul campo è stata elaborata una **Carta degli elementi geomorfologici della laguna** (Tav. 2, Figura 4.102) il cui scopo principale è quello di fornire uno strumento cartografico quanto più possibile aggiornato e completo degli elementi geomorfologici presenti in laguna.

Al suo interno sono stati mappati i seguenti elementi suddivisi in due macro-categorie:

*Morfologie naturali:*

- Bocca tidale attiva
- Bocca tidale occlusa
- Canale principale e secondario
- Isola
- Cordone litorale / accumulo eolico / duna
- Barena
- Velma

*Elementi antropici:*

- Argine di conterminazione lagunare
- Argine
- Difesa costiera o spondale in muratura
- Molo guardiano
- Pennello
- Scogliera
- Valle da pesca

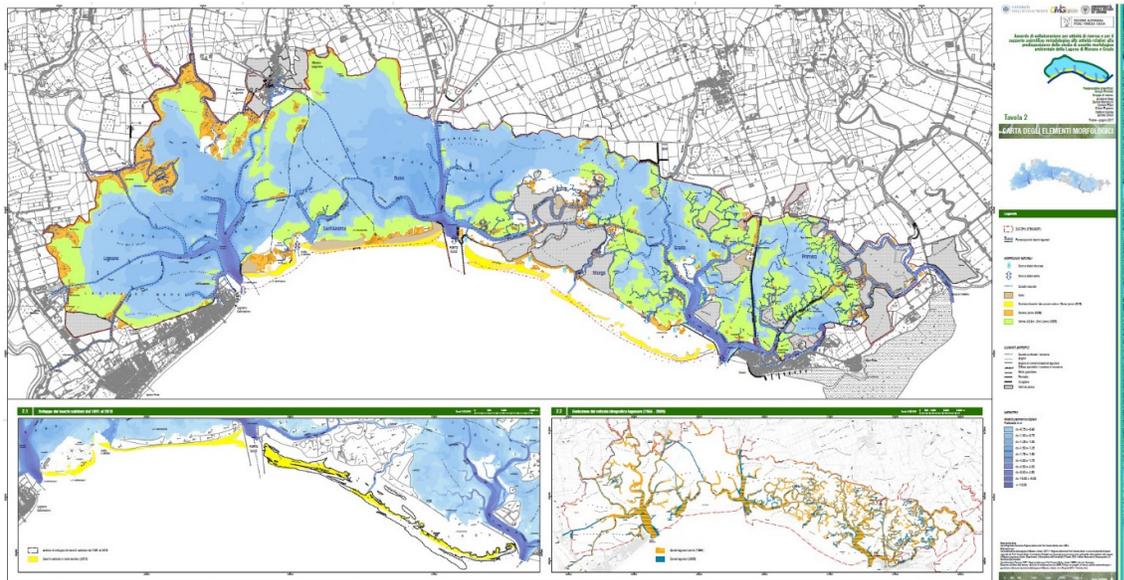


Figura 4.102. La carta degli elementi morfologici presentata come Tavola 2.

Il grafico di Figura 4.103 evidenzia la distribuzione areale dei principali elementi morfologici su tutta la laguna.

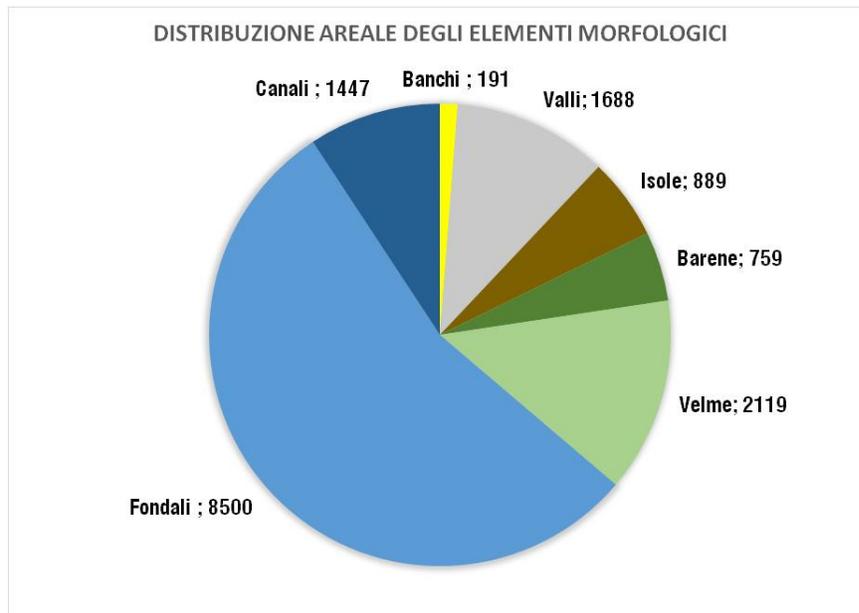
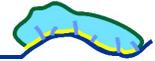


Figura 4.103. Distribuzione areale dei principali elementi morfologici presenti in laguna (i valori sono espressi in ettari).

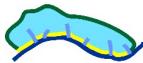
Dal confronto dei dati batimetrici, topografici e morfologici in un arco di circa 60 anni si sono potute desumere alcune chiare tendenze evolutive in atto per la Laguna di Marano e Grado, di seguito sintetizzate.

- I fondali lagunari (comprendenti piane tidali e piane sub-tidali) mostrano una chiara e generalizzata tendenza all'approfondimento che corrisponde a un valore medio di 17 cm e coinvolge in tutto 6784 ha, pari al 53% della superficie lagunare analizzata. Di questi 1427 ha sono stati soggetti a un approfondimento elevato (cioè superiore ai 0.5 m). I fondali che si sono mantenuti stabili rappresentano il 31% della superficie lagunare analizzata, mentre solo il 16% mostra un fenomeno di deposizione (1994 ha); di queste ultime superfici un po' meno della metà (820 ha) sono costituite da canali lagunari, interessati da un fenomeno di interrimento molto diffuso che ha portato in molti casi alla scomparsa del canale stesso. I fondali interessati da deposizione sono presenti quasi esclusivamente lungo i margini lagunari del bacino di Lignano e nella porzione occidentale del bacino di Buso.

- La modifica dell'ipsometria riguarda in maniera differenziata i vari bacini, ma mostra una tendenza simile per tutti ossia una perdita significativa di fondali a basso battente d'acqua e un aumento di frequenza di quelli a maggior battente; questo processo è accompagnato da una perdita di caratterizzazione morfologica (le classi di profondità sono distribuite in maniera meno differenziata rispetto a 54 anni fa).

- Il bilancio sedimentario della laguna calcolato per via indiretta dal confronto di dati topo-batimetrici indica un deficit sedimentario con perdita annua di 256299 mc (per l'intervallo di tempo 1964-2009). Questo bilancio è il risultato della differenza tra l'erosione dei fondali (22346495 mc in 54 anni) e la deposizione dei canali (7735763) e si tratta perciò di sedimento che esce dalla bocche e va irrimediabilmente perduto.

- Il sistema dei banchi sabbiosi esterni ha subito, nell'intero intervallo di tempo considerato, un notevole aumento di superfici emerse, quantificabile in 70.48 ha complessivi nel periodo 1891 - 2015. Dal 1891 al 1954 si evidenzia una leggera perdita di superfici emerse seguita, seppur a fasi alterne, da un trend nettamente positivo fino al 2015 che risulta però dalla sommatorie di modifiche di segno opposto. Per quanto concerne invece la variazione della linea di riva il sistema, dapprima caratterizzato da una fase progredante (1891 - 1954), ha subito un leggero ma costante arretramento quantificato in 55.5 m in media



rispetto alla posizione assunta nel 1954. Ciò sembrerebbe indicare una fase di arretramento generalizzato dei banchi in risposta all'innalzamento del livello del mare. All'interno di questo trend generale, sul breve periodo il sistema è caratterizzato da rapide e a volte repentine modificazioni sia costruttive che distruttive che coinvolgono ampie superfici con tassi massimi di 12.74 ha/anno e -5.1 ha/anno rispettivamente.

- Le isole barriera (Sant'Andrea e Martignano) sono caratterizzate da maggior stabilità nel tempo anche se, similmente ai banchi, mostrano estesi ambiti di neo-formazione. Nello stesso tempo i segnali più recenti mostrano una tendenza all'arretramento per l'isola di Martignano con processi di washover riguardo ai quali si potrà accertare solo in futuro un eventuale fase di ricostruzione, come si è già verificato nel passato.

- Le barene nel complesso hanno subito una perdita di superficie di 144 ha (nel periodo 1954-2006), che corrisponde al 16% delle barene presenti originariamente. Questa perdita è in realtà il risultato di una sommatoria di variazioni di segno opposto ben più rilevanti e che in gran parte si sono compensate a vicenda. Tra i fenomeni più importanti che hanno provocato le perdite di barene sono stati osservati gli interventi antropici diretti (bonifiche, escavo di canali, modifiche e ampliamenti delle valli da pesca) con ben 175 ha, seguiti dall'annegamento (-181 ha), l'erosione causata dal moto ondoso da natanti (-53 ha) e dal moto ondoso da vento (-53 ha). Molte di queste perdite sono state compensate dall'apporto sedimentario tidale (+137 ha) e da quello fluviale (+95 ha), accanto alla formazione di barene nelle aree paralagunari associate ai banchi esterni e alle isole barriera (+53 ha) e in aree vallive abbandonate (+27 ha) e infine per riporto di sedimenti dragati (+8 ha).

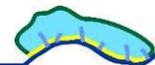
Una volta eliminati dal computo gli interventi antropici diretti ed effettuate le compensazioni tra aree guadagnate e aree perse, l'evoluzione delle barene mostra un bilancio nettamente positivo per il primo periodo (+37 ha nel 1954 -1990) e negativo per il secondo (-15 ha nel 1990-2006), almeno a scala di intera laguna. I bilanci si mostrano però molto diversi tra loro se si considerano i singoli bacini che costituiscono la laguna.

-Le piane tidali rappresentano l'elemento di maggior criticità in quanto dal confronto con il dato del 2009 risulta una perdita di 2672 ha, pari al 45.9 % dell'estensione complessiva del 1964. La forte riduzione di questa classe di fondali appare pressoché generalizzata sull'intera laguna. Fanno eccezione alcune aree della laguna di Marano, soprattutto a ridosso del margine occidentale e nella secca di Muzzana, dove si assiste a un ampliamento delle superfici.

Le informazioni sin qui disponibili dipingono un quadro piuttosto chiaro di trasformazione del territorio lagunare che sta avviandosi verso una semplificazione topografica per appiattimento delle forme.

Pur conservandosi in qualche caso le peculiarità morfologiche dei singoli bacini, l'incremento del livello del mare, unitamente al moto ondoso naturale o indotto dai natanti stanno producendo la scomparsa delle velme e delle barene, che sono gli habitat tipici dell'ecosistema lagunare e sui quali si insedia la gran parte della biodiversità.

Le perdite sedimentarie avvenute nel recente passato non possono essere recuperate, ma una attenta gestione della risorsa sedimento e un contestuale monitoraggio morfologico, finalizzato a comprendere gli aspetti evolutivi più complessi di alcune entità e le azioni di feedback esercitate ad esempio dalle coperture a fanerogame, potrà aiutare nella definizione della tipologia delle azioni da attuare, nella programmazione degli interventi e negli ordini di priorità degli stessi.



## 5. Dinamica dei fondali: aspetti modellistici (a cura di UniUD)

Le analisi idrodinamiche descritte nel capitolo 3 e la mappatura evolutiva della laguna presentata nel capitolo 4 sono finalizzate entrambe e congiuntamente all'individuazione di aree all'interno del bacino lagunare, che per una maggiore esposizione e vulnerabilità alla messa in sospensione del sedimento dal fondo e successivo trasporto, hanno subito negli anni dei processi erosivi importanti.

Tali aree possono essere potenzialmente considerate strategiche ai fini del nuovo piano morfologico, in quanto candidate alla ricollocazione del materiale derivante dai dragaggi di ordinaria o straordinaria manutenzione dei canali navigabili.

Al fine di confermare la criticità delle aree e valutare successivamente la durabilità di eventuali interventi, è necessario definire il modello morfodinamico della laguna.

Tale modello deve essere in grado di riprodurre la variazione dei fondali su un periodo di tempo compatibile con la durata media degli stessi interventi, da realizzare in un'ottica di conservazione dell'equilibrio dinamico della laguna, che esclude pertanto la conterminazione del materiale.

In questo capitolo si riassumono sinteticamente le fasi seguite per la definizione del modello morfodinamico della laguna, dalla definizione dei parametri funzionali al trasporto solido alle effettive simulazioni realizzate.

### 5.1. Individuazione dei parametri funzionali al trasporto solido

Per poter stabilire se le tensioni al fondo derivanti dai campi idrodinamici di livello, corrente e moto ondoso, sono sufficienti alla risospensione del sedimento solido e al suo trasporto, provocando la variazione delle quote del fondo, è necessario definire i parametri funzionali al modello morfodinamico.

Questo comporta la necessità di:

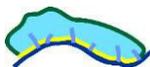
1. definire le caratteristiche sedimentologiche della laguna, in termini di diametro rappresentativo dei sedimenti incoerenti e coesivi e la loro distribuzione percentuale;
2. assegnare la tensione critica di erosione, il cui superamento da parte della tensione massima al fondo dovuta alla combinazione di correnti di marea e oscillazione del moto ondoso, comporta la mobilitazione del sedimento coesivo; per i sedimenti granulari la tensione critica di erosione viene calcolata direttamente sulla base del diametro medio degli stessi;
3. stabilire la successione temporale delle classi di vento, sia in termini di direzione che intensità, sulla forma della marea media annua ricavata dall'analisi spettrale, in maniera tale che sia rappresentativa delle forzanti su scala annuale.

Per la caratterizzazione sedimentologica della laguna ci si è basati su serie di campionamenti e carotaggi effettuati in laguna negli ultimi anni e forniti dalla Regione FVG e dall'Arpa e opportunamente digitalizzati e sintetizzati in una mappa di distribuzione della percentuale di materiale coesivo.

La mappa, riportata in Figura 4.15, evidenzia come tale percentuale sia molto bassa in un'area ristretta attorno alle bocche lagunari, dove invece prevale nettamente la sabbia. Lungo i canali principali che da esse dipartono, la percentuale tende poi a crescere progressivamente, diventando prossima al 100% sulle piane tidali, lungo i ghebi e nelle velme e barene.

Quale diametro medio dei sedimenti, coerentemente ai dati forniti, è stato assunto il valore di 180  $\mu\text{m}$  per il granulare e 30  $\mu\text{m}$  per il coesivo.

Per l'assegnazione della tensione critica di erosione non ci si è potuti riferire a dati noti per la laguna di



Marano e Grado. La mancanza di riferimenti locali ha comportato un lavoro scrupoloso di confronto, per similitudine morfologica, con i valori di tensione critica determinati per via sperimentale durante diverse serie di campagne condotte all'interno della laguna di Venezia e i cui dati sono stati pubblicati (Amos et al., 2004), diventando così un riferimento scientifico.

Vista la forte variabilità sia spaziale che stagionale della tensione critica misurata in più siti della laguna e in momenti diversi dell'anno, si è scelto di suddividere i valori per tipologie comuni, sintetizzate nelle Figure 5.2 – 5.5.

Nello specifico è stato possibile riconoscere le seguenti classi morfologiche:

- zone emerse o sommerse dalle alte maree;
- piane sommerse anche dalle basse maree;
- fondali che presentano una copertura di fanerogame variabile tra il 20% e il 60%;
- fondali prevalentemente sabbiosi, tipici dei canali principali in prossimità delle bocche lagunari.

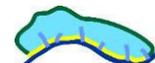
Una caratterizzazione analoga è stata fatta per le morfologie tipiche della laguna di Marano e Grado.

Questa procedura si dimostra innovativa, poiché si differenzia dai tradizionali approcci seguiti nello studio morfodinamico di ambienti lagunari o di transizione, secondo i quali in genere si assume un unico valore medio di tensione critica di erosione al fondo per materiali coesivi.

Le scelte adottate sono sintetizzate in Tabella 5.1, dove si riportano delle immagini a titolo esemplificativo per identificare le diverse morfologie.

Tabella 5.1. Classi di tensione critica per la laguna di Marano e Grado.

Classe morfologica	Immagine rappresentativa	Valore di tensione critica
Zone emerse o caratterizzate da una morfologia a canali incisi		1.8 Pa
Fondali con copertura di fanerogame e/o alghe		1.3 Pa
Piane sommerse e canali lagunari		0.7 Pa



Oltre alle tre classi visualizzate in tabella si è ritenuto opportuno introdurre una quarta categoria, riferita a fondali che per una qualche causa, anche esterna, sono soggetti a maggiore mobilità del sedimento coesivo dal fondo. A questa classe è stato associato un valore di tensione critica di erosione pari a 0.5 Pa.

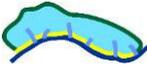
Ci si riferisce, ad esempio, alle zone assentite alla molluschicoltura, all'interno delle quali l'utilizzo degli attrezzi per la pesca è in grado di causare una risospensione del materiale solido paragonabile a quello degli eventi di moto ondoso più intensi, come verificato in uno studio condotto all'interno della laguna di Venezia (Pranovi et al., 2004).

L'ultimo passaggio fondamentale per le simulazioni di trasporto solido con il modello accoppiato morfodinamico – spettrale è consistito nel definire le condizioni al contorno, stabilendo un'opportuna successione temporale delle classi di vento, sia in termini di direzione che intensità, sulla forma della marea media annua.

A partire dalle frequenze riportate nelle tabelle a doppia entrata 3.13 e 3.15, sono state calcolate le durate di ciascuna classe di intensità e direzione del vento, su un arco temporale coincidente con la periodicità della marea media.

Le classi sono state quindi alternate a periodi di calma equamente distribuiti, ottenendo la successione schematizzata in Figura 5.6.

Questa successione rappresenta dunque la sintesi delle indagini mareografiche e anemometriche volte a stabilire le forzanti che agiscono mediamente nell'arco di un anno in laguna e da cui dipenderanno la distribuzione dei livelli, delle velocità e in particolare delle tensioni al fondo, responsabili dell'eventuale sollevamento e successivo trasporto dei sedimenti.



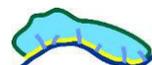
Zone sommerse dalle alte maree



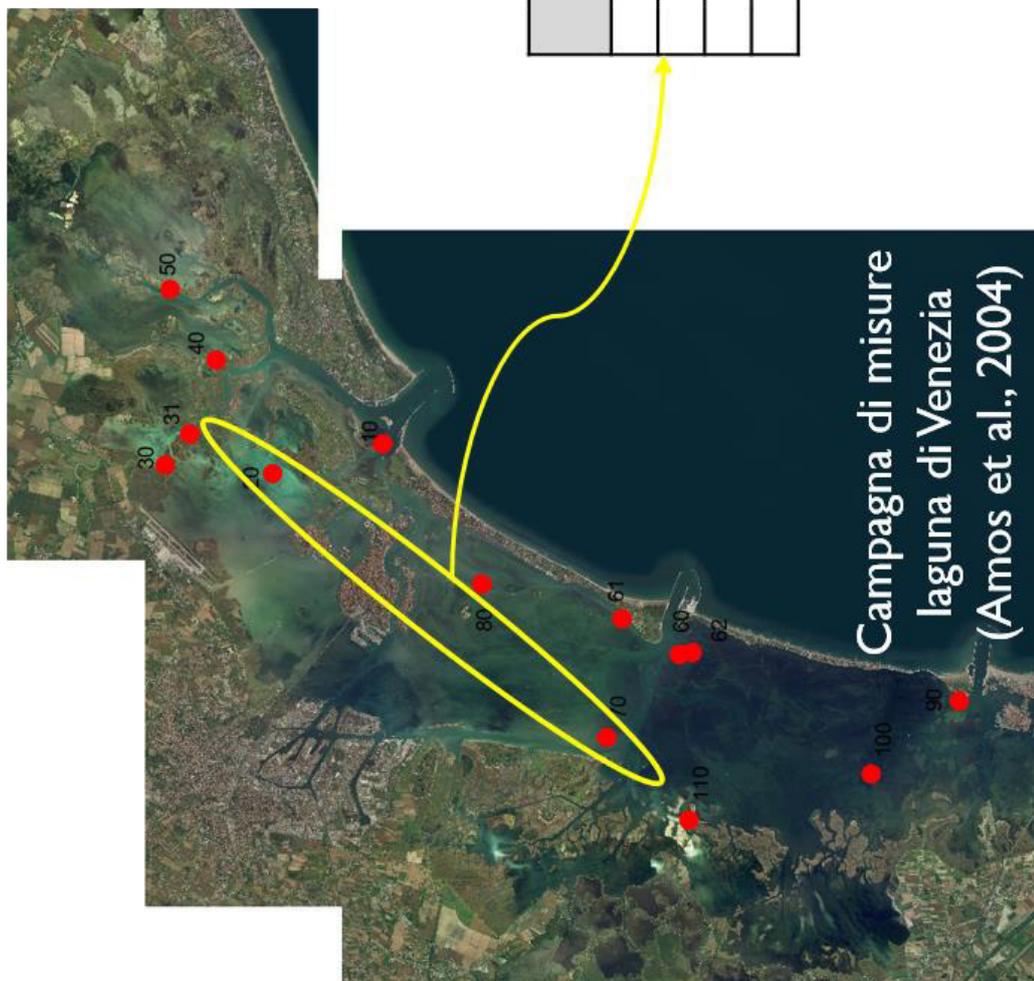
siti	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\tau_{\text{crit}}$ (Pa)	$\tau_{\text{crit}}$ (Pa)	$\tau_{\text{crit}}$ (Pa)	$\tau_{\text{crit}}$ (Pa)
33	20	0.79			0.79
40	22	3.06	0.84		1.95
53	16	2.23			2.23
80	30	0.85	0.38		0.615



Figura 5.2. Valori sperimentali di tensione critica di erosione per materiale coesivo in zone sommerse dalle alte maree.

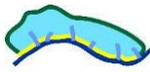


Piane sommerse anche dalle basse maree



siti	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\tau_{\text{crit}}$ estiva (Pa)	$\tau_{\text{crit}}$ invernale (Pa)	$\tau_{\text{crit}}$ media (Pa)
20	28	0.35	1.08	<b>0.715</b>
21	33	0.22	1.13	<b>0.675</b>
22	33	0.44		<b>0.44</b>
70	58	0.59	0.61	<b>0.6</b>

Figura 5.3. Valori sperimentali di tensione critica di erosione per materiale coesivo nelle piane sommerse anche dalle basse maree.



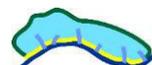
Copertura con fanerogame dal 20 al 60%



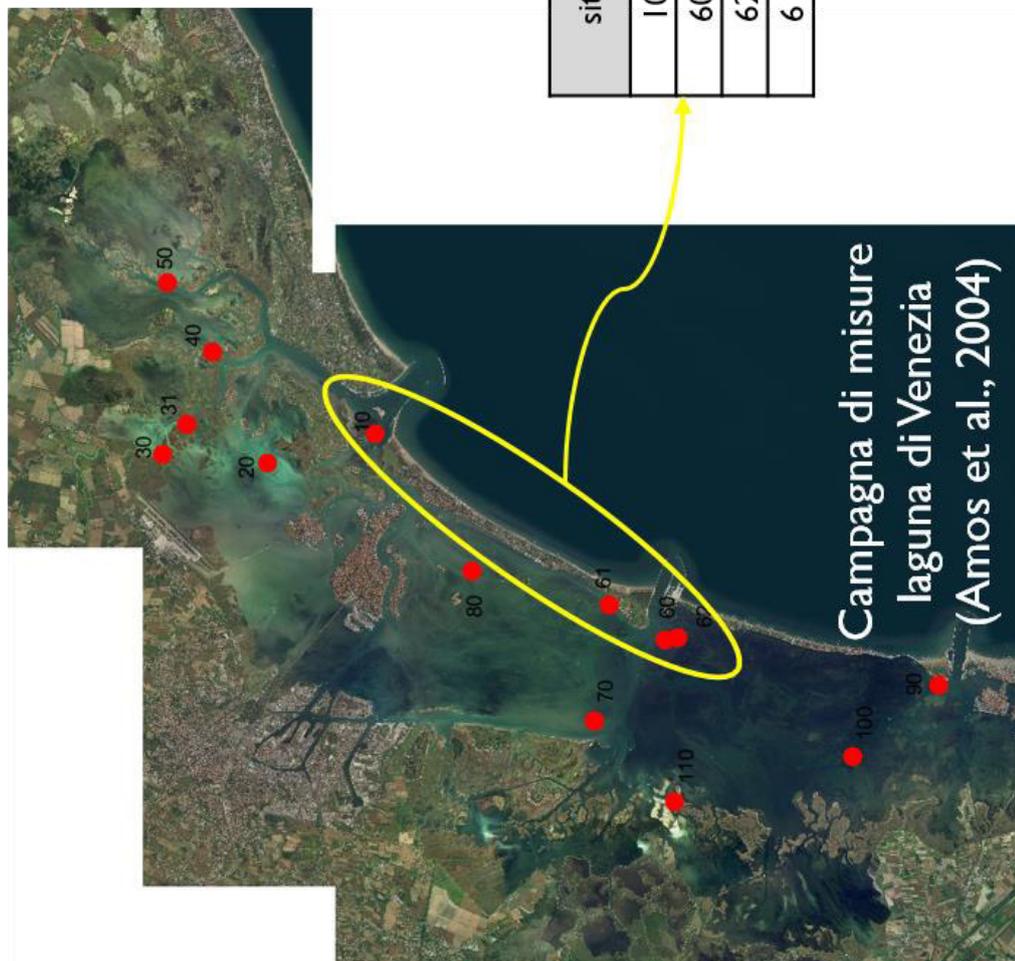
siti	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\tau_{\text{crit}}$ estiva (Pa)	$\tau_{\text{crit}}$ invernale (Pa)	$\tau_{\text{crit}}$ media (Pa)
50	10	1.42	0.99	<b>1.205</b>
51		1.51	0.48	<b>0.995</b>
52		2.12		
53	16	2.23		
61		1.13	0.62	<b>0.875</b>
100	21	0.39		
110	23	0.88		

Campagna di misure  
laguna di Venezia  
(Amos et al., 2004)

Figura 5.4. Valori sperimentali di tensione critica di erosione per materiale coesivo nei fondali che presentano una copertura di fanerogame compresa tra il 20% e il 60%.



## Fondo sabbioso con *Cymodocea Nodosa*



siti	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\tau_{\text{crit}}$ estiva (Pa)	$\tau_{\text{crit}}$ invernale (Pa)	$\tau_{\text{crit}}$ media (Pa)
10				
60	74	0.36	0.53	<b>0.445</b>
62	81			
61		1.13	0.62	<b>0.875</b>

Figura 5.5. Valori sperimentali di tensione critica di erosione per materiale coesivo nei fondali prevalentemente sabbiosi.

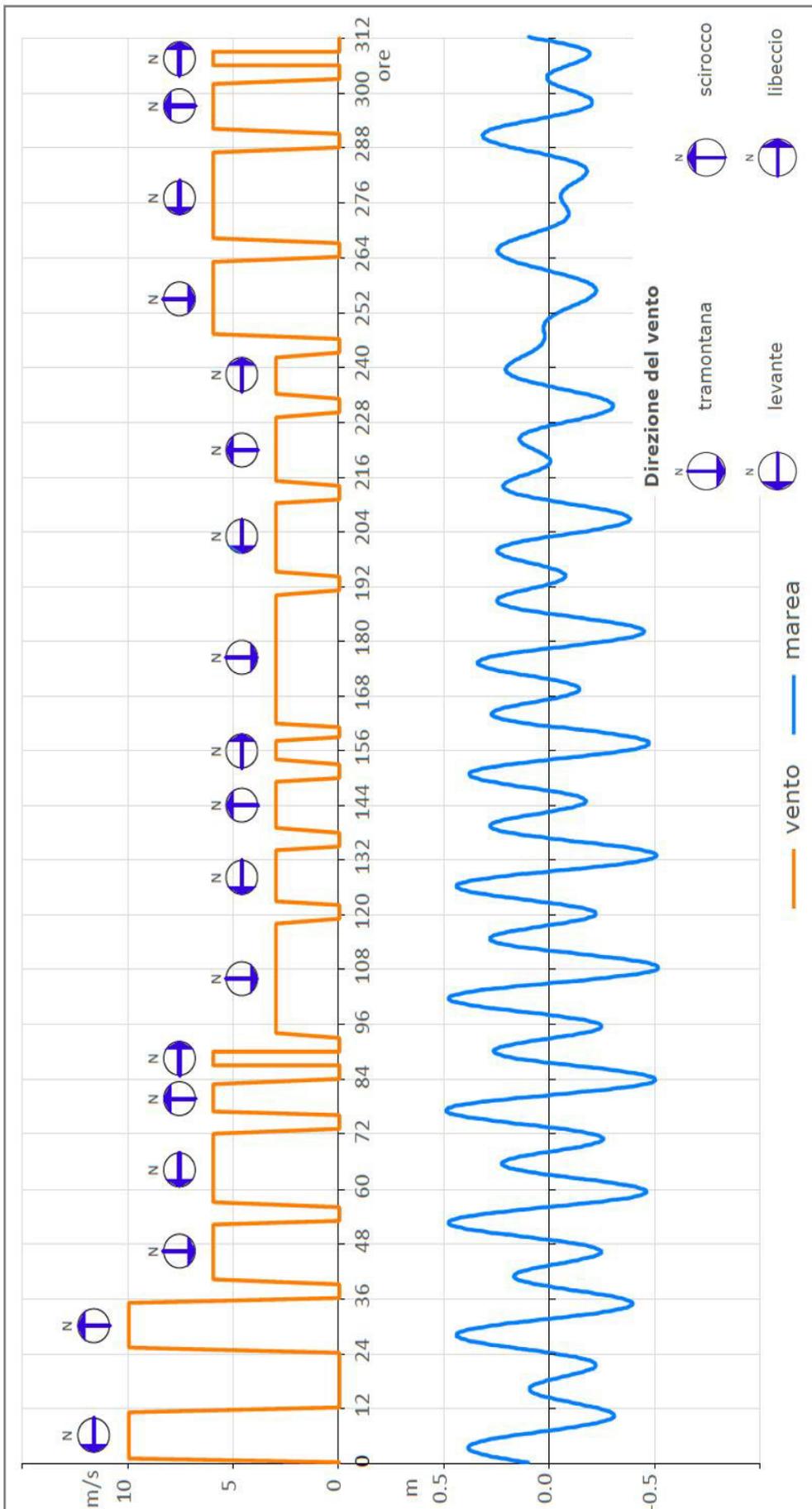
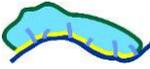
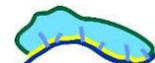


Figura 5.6. Successione temporale di venti e marea.



## 5.2. Simulazioni di trasporto solido

Definite tutte le grandezze fondamentali per il modello morfodinamico è seguito un lungo processo di affinamento del modello stesso, che attraverso un metodo di tipo “*predictor – corrector*” ha consentito di migliorare l’assegnazione dei parametri determinati sulla base delle campagne sperimentali nella laguna di Venezia. Questo procedimento è stato effettuato sulla base dei volumi dragati in alcuni tratti critici all’interno della laguna, che necessitano di interventi ordinari di manutenzione.

I dati, forniti dalla Regione FVG relativamente agli interventi degli ultimi anni, sono sintetizzati in Tabella 5.2; i canali elencati sono evidenziati in figura 5.7 per una migliore comprensione.

Tabella 5.2. Storico dei volumi dragati negli ultimi anni in alcuni tratti critici all’interno della laguna di Marano e Grado.

Anno/ Canale	Volumi dragati (m <sup>3</sup> )							
	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2017 (previsti)
Cialisia	12000					51000		10000
Coron	40000		7200		37000		122000	
Pantani	73000						70000	65000
Marano			1500			18000	70000	
Barbana		1800		800	3000	5000	20000	5000
Tajada								7000

Il lungo processo iterativo ha comportato oltre 20 simulazioni, al termine delle quali si è pervenuti ad una mappa di distribuzione delle tensioni critiche di erosione per il materiale coesivo e alla variazione media annua del fondo per la combinazione di moto ondoso e marea.

I risultati sono riportati rispettivamente in figura 5.8 e 5.9. In particolare l’immagine della variazione del fondo, restituita nella Tavola 4 “Variazione del fondo media annua” allegata alla presente relazione, evidenzia con gradazioni di colore tendenti al rosso le aree soggette ad erosione e in marroncino quelle che rilevano deposito.

Si riconosce che il materiale sedimentario risospeso dal fondo per la combinazione di moto ondoso e corrente, si deposita all’interno dei canali, con un’ottima corrispondenza nei tratti effettivamente riconosciuti come critici.

Anche l’entità dei volumi, riportati in figura 5.10 è coerente con i valori medi annui stimati sulla base dei dati raccolti.

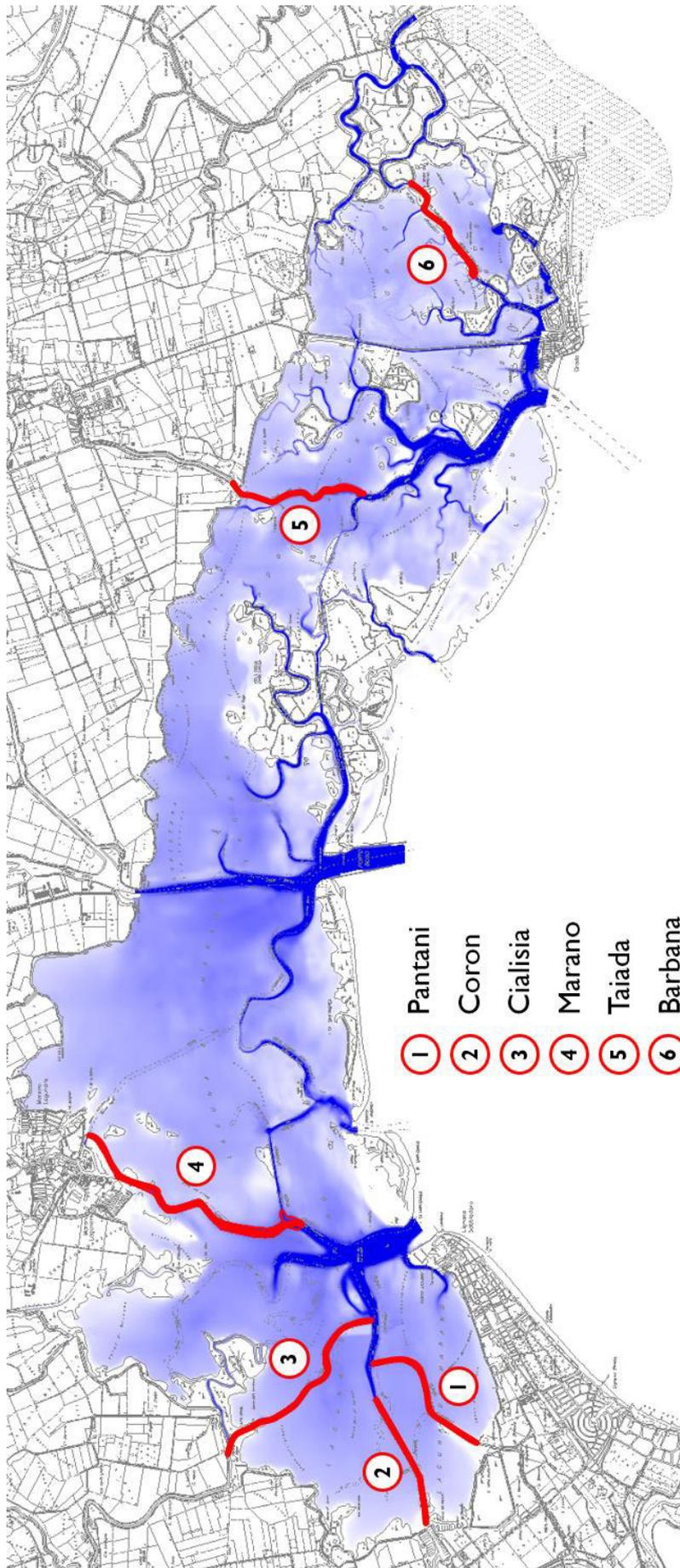
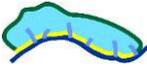


Figura 5.7. Tratti critici in laguna che necessitano di dragaggi e/o manutenzioni periodiche.

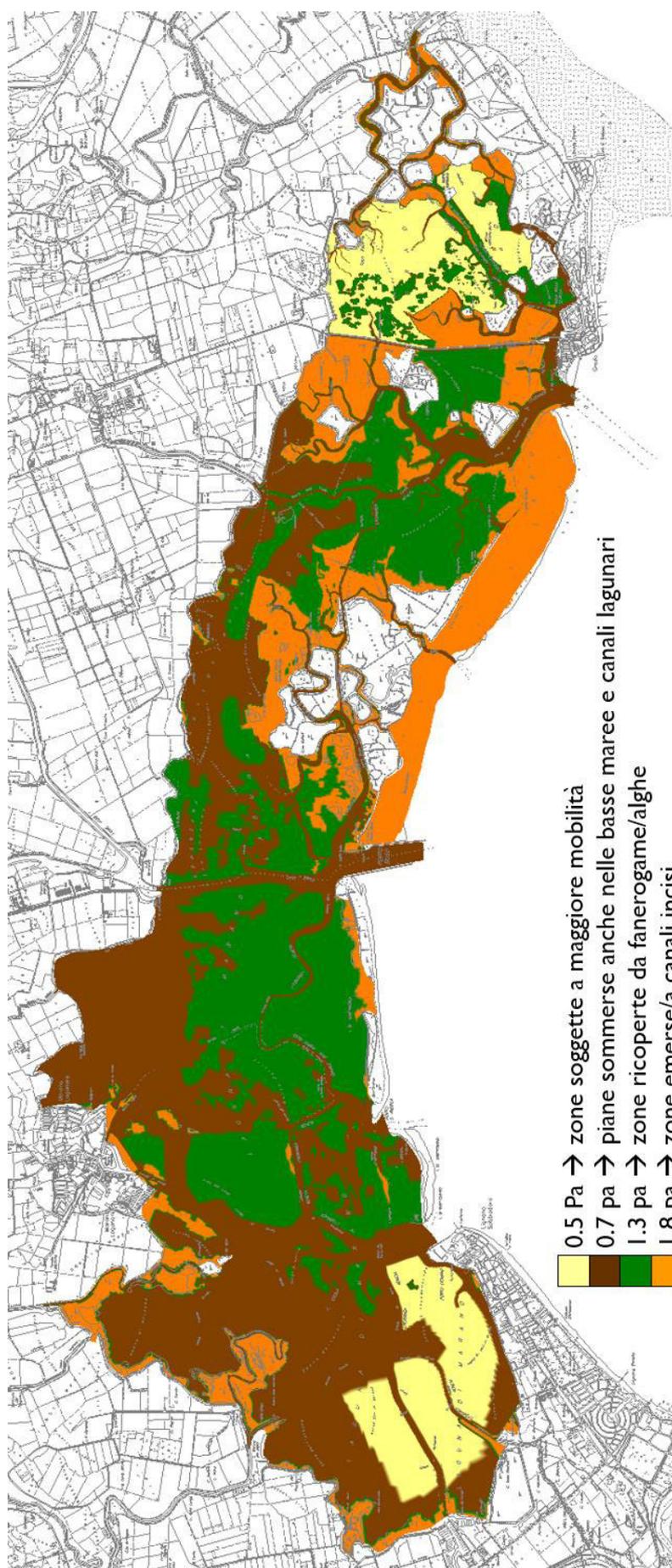
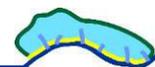


Figura 5.8. Distribuzione delle tensioni critiche di erosione per materiale coesivo.

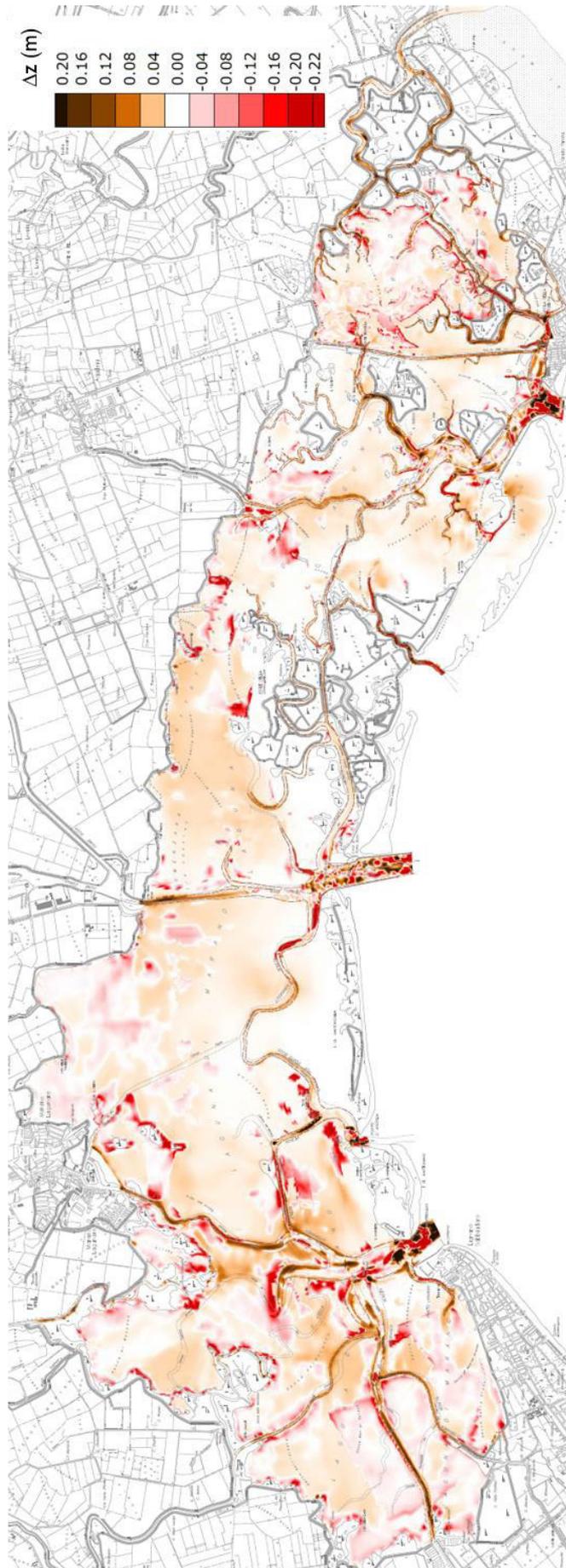
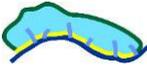


Figura 5.9. Variazione del fondo media annua in combinazione di moto ondoso e correnti di marea (si rimanda alla Tavola 4).

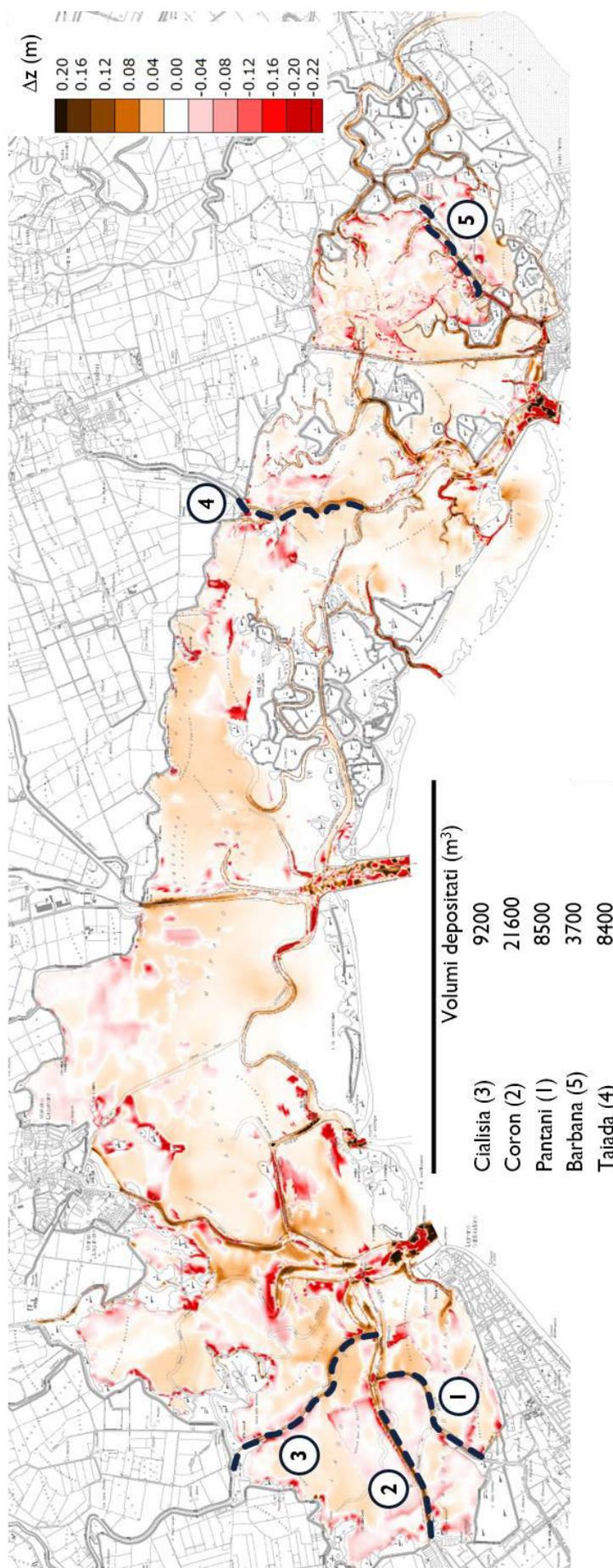
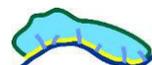
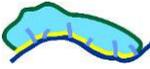


Figura 5.10. Volumi depositati nei canali evidenziati con tratteggio, a seguito della variazione media annua del fondo in laguna.





## **6. Linee di indirizzo per la gestione geomorfologica della laguna (a cura di UniTS)**

### **6.1. Obiettivi generali**

Alla luce delle analisi svolte grazie a questo *Studio* e da quanto noto grazie agli studi precedenti sulla laguna possono essere sintetizzati i seguenti obiettivi generali per le azioni di salvaguardia e conservazione del sito ZSC:

- Garantire la dinamicità del sistema lagunare accompagnandolo nel suo processo di adattamento continuo al cambiamento climatico e alle grandi modificazioni antropiche intervenute nel passato.
- Impedire ulteriori interventi strutturali a finalità diversa da quella conservazionista che possano avere conseguenze rilevanti e non sempre prevedibili sul sistema idraulico, sedimentario e morfologico.
- Contrastare, per quanto possibile, le modifiche indotte dall'innalzamento del livello del mare.
- Garantire la permanenza e l'apporto di sedimenti all'interno della laguna per contrastare l'attuale deficit sedimentario.
- Garantire l'equilibrio fra apporto ed erosione delle sabbie sul sistema litorale costituito dai banchi esterni e dalle isole barriera, tutelandone la naturale evoluzione e le fonti sedimentarie poste ad est.
- Mantenere, conservare e incrementare le superfici intertidali (barene, velme) sia per il loro ruolo nell'equilibrio morfo – idraulico dell'intera laguna sia in qualità di morfologie che costituiscono il substrato per habitat di interesse comunitario.
- Tutelare le attuali fenomenologie morfologiche, sedimentologiche e idrologiche.
- Mantenere, tutelare e, laddove possibile, ripristinare gli usi tradizionali della laguna quali la vallicoltura, la pesca e l'utilizzo dei canali navigabili, indirizzandoli verso una pratica gestionale sostenibile e volta alla tutela del sistema morfologico ed ecologico nel suo complesso.
- Indirizzare le modalità e le tecniche degli interventi di ripristino morfologico a una finalità prevalentemente ecologica.
- Garantire e realizzare una gestione adattativa della laguna e degli interventi attivi che vi vengono realizzati.

### **6.2. Principali elementi morfologici della laguna**

In questa fase del lavoro verrà effettuata una prima stesura di indicazioni utili alla futura predisposizione delle Linee guida per la tutela dell'assetto morfologico-idrologico e sedimentologico della laguna, per la movimentazione dei sedimenti in laguna e per la conservazione e la ricostruzione di elementi morfologici.

La prima parte dell'analisi (schema logico in Figura 6.1 riguarda gli elementi di interesse geomorfologico e quale substrato di habitat di rilevante interesse conservazionistico che costituiscono l'ambiente lagunare (barene, velme, banchi sabbiosi esterni). Relativamente a essi nel capitolo 4 è già stata svolta un'analisi degli aspetti morfo - evolutivi comprendenti stato di fatto, stato di conservazione e stato conoscitivo.

Questa parte dello *Studio* ne affronta invece gli aspetti gestionali e comprende approcci e tecniche gestionali, criteri di priorità di intervento, necessità di approfondimento conoscitivo con le indicazioni per sviluppare apposite indagini e per un piano di monitoraggio permanente e necessità regolamentative in merito ad alcune delle attività attualmente sviluppate all'interno del Sito.

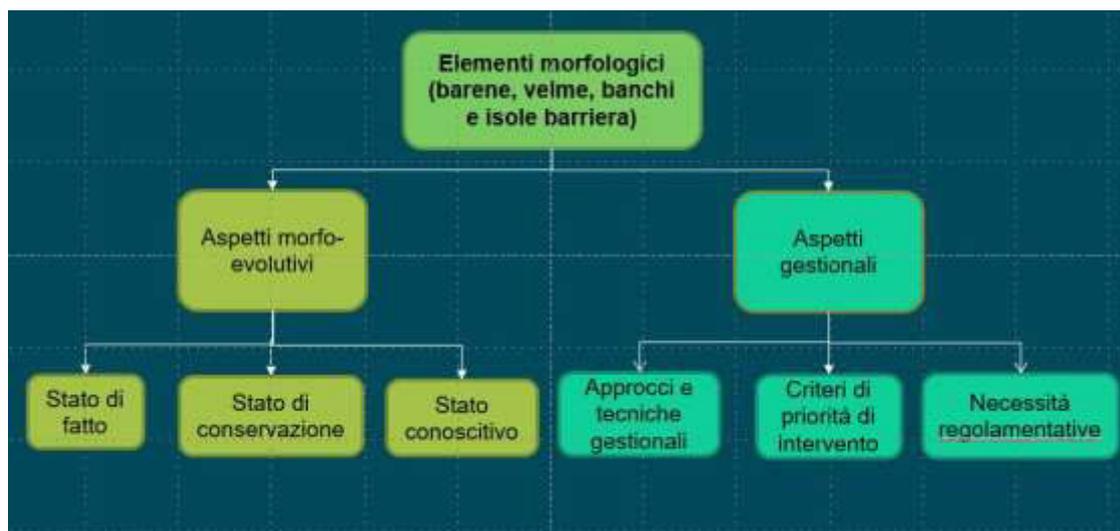


Figura 6.1 Schema logico della parte di analisi che riguarda gli elementi morfologici della laguna.

La seconda parte è relativa alla gestione dei sedimenti in laguna finalizzati alla conservazione e /o al miglioramento del suo assetto idraulico e morfologico e comprende l'individuazione di principi base e le prime indicazioni per la stesura di un *Disciplinare per la movimentazione di sedimenti* da parte delle autorità preposte.

### 6.2.1. Banchi esterni e isole barriera

Le isole-barriera sono entità geomorfologiche costiere molto importanti che proteggono la terraferma, le baie e gli estuari dalle mareggiate e dagli eventi di tempesta (Stone & Mc Bride, 1998); caratterizzano approssimativamente il 12% delle coste mondiali (Pilkey & Fraser, 2003) e si contraddistinguono per la forte dinamicità. Assumono inoltre un importante valore naturalistico per gli habitat presenti e poiché costituiscono l'ambiente ideale per moltissime specie di uccelli, sia sedentarie che migratorie (Moore et al., 1990).

Le funzionalità e i vantaggi legati a questi particolari ambienti costieri sono da tempo minacciati a scala globale dalla riduzione degli input sedimentari, dall'incessante fenomeno dell'innalzamento del livello marino e dalle attività antropiche (Rosati, 2009). Per questo motivo, la tutela delle isole-barriera assume un ruolo di fondamentale importanza nelle politiche di gestione delle fasce costiere. La modalità di ripristino più frequente è rappresentata dai ripascimenti delle spiagge, condotti su larga scala sin dal 1920. La gestione di questi sistemi molto dinamici è legata alla difficile individuazione di indicatori per determinare il loro stato di qualità, nonché la loro evoluzione nel tempo. Rosati (2009) individua la quota dei banchi come un elemento imprescindibile per fronteggiare le acque alte e le tempeste e quindi per la possibilità di mantenersi nel tempo.

In secondo luogo, anche l'ampiezza critica dell'isola-barriera appare un elemento di valutazione della possibilità di sopperire o meno a eventi estremi e quindi della capacità di conservarsi nel tempo (Rosati, 2009); la determinazione e quantificazione di questo indicatore è però alquanto difficile poiché si basa anche sulla stima reale del bilancio sedimentario dell'area.

Nel caso della laguna di Marano e Grado, viste le differenti tipologie di isole barriera presenti è necessario adottare approcci gestionali diversi. Per i banchi esterni è un'operazione piuttosto difficile stabilire quali siano le diverse porzioni realmente a rischio applicando metodologie che si basano ad esempio sulla relazione tra quota massima del banco e altezza delle onde di tempesta che raggiungono la costa. I banchi infatti costituiscono delle morfologie non del tutto strutturate, come evidenziato dalle quote limitate e dai molteplici elementi di forte instabilità; essi, pur attenuando gli effetti delle mareggiate invernali



sull'ambiente lagunare, non possono considerarsi il loro vero baluardo difensivo costituito invece dalle isole barriera relitte poste alle loro spalle (Marina di Macia e Manzi, isola di Morgo, isola di Anfora). L'analisi storica effettuata sui banchi ne ha infatti evidenziato la forte dinamicità, mostrando come siano soggetti a eventi fortemente distruttivi e siano poi capaci di riformarsi anche nel breve periodo.

Le strategie di conservazione e gestione vanno quindi indirizzate a un approccio di tipo adattativo e all'individuazione di opportuni indicatori ed elementi di valenza non strettamente legati a una precisa collocazione spaziale bensì, ad esempio, al sistema banchi nel suo complesso.

#### *Tutela della morfodinamica dei banchi:*

In primo luogo la rapidità con cui i banchi sono in grado di formarsi, svilupparsi e scomparire porta all'impossibilità di mapparli precisamente come elemento geomorfologico da tutelare. Si propone perciò di delimitare un'area di tutela a partire dal massimo ingombro storico dei banchi (Figura 6.2), prevedendo anche un'area buffer verso mare (ad esempio fino alla batimetrica -5m) e verso terra (comprendente l'area paralagunare di retrobarriera) al fine di individuare l'area potenzialmente interessata dalla loro futura evoluzione.

La tutela di questi ambienti deve quindi basarsi su una gestione adattativa del sistema che preveda la tutela dei processi morfodinamici che ne sono base, piuttosto che vincolarsi a una determinata area geografica definita in un preciso momento. Vanno quindi in primo luogo impediti la realizzazione di manufatti rigidi a difesa del sistema insulare costiero quali pennelli, scogliere, o altro che possono ostacolare o modificare la dinamica longshore.

Per il mantenimento e la tutela del sistema dei banchi sono di importanza vitale le fonti e i flussi sedimentari che provengono da est: dalla foce dell'Isonzo alla bocca di Grado. Tutti gli interventi volti quindi a mitigare gli effetti erosivi di queste aree sopraflutto dovrebbero essere pianificati con doverosa accuratezza poiché potrebbero avere serie ripercussioni sul mantenimento stesso dei banchi.

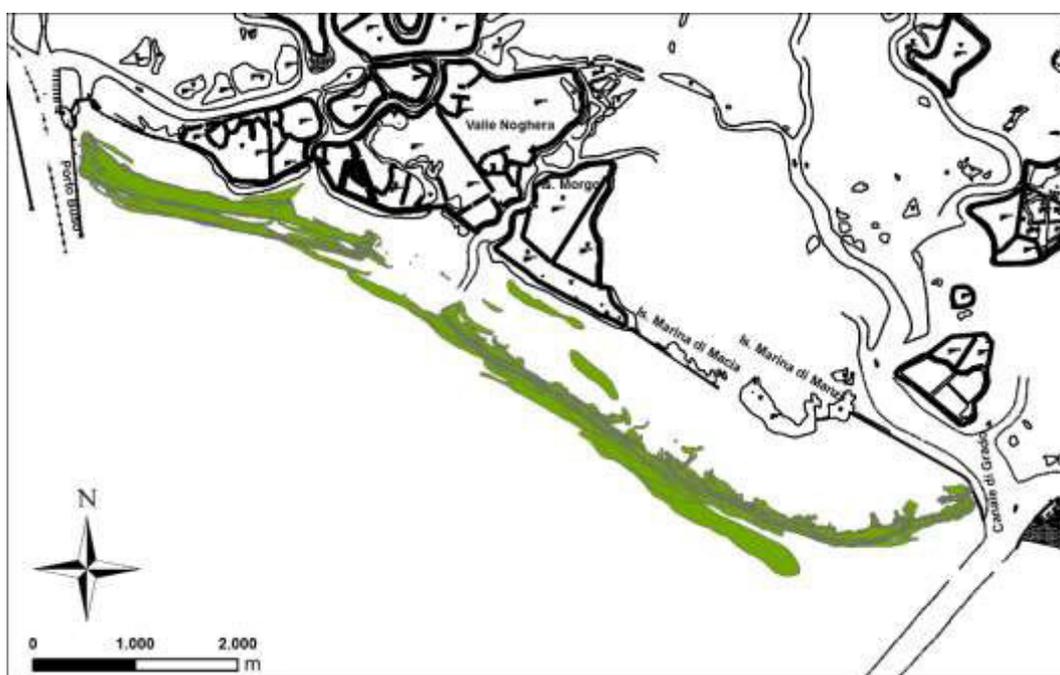
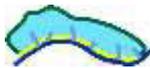


Figura 6.2. "Area di massimo ingombro storico" dei banchi, ovvero l'area nel complesso occupata dai banchi durante loro evoluzione dal 1891 a oggi.



### Tutela degli habitat

Analoga difficoltà si riscontra nell'individuazione degli habitat oggetto di tutela. Infatti, gli habitat individuati e descritti da Poldini nella sua cartografia del 2006 sono stati soggetti fino ad oggi a notevoli modificazioni sia in termini di posizione che di estensione. Anche in questo caso essendo gli habitat strettamente associati ai processi geomorfologici, la tutela non può essere vincolata a una determinata area geografica definita in un preciso momento, ma deve dotarsi di strumenti e indicatori ad hoc.

In primo luogo le aree caratterizzate da quote basse rispetto al livello medio mare possono favorire i processi di washover con la formazione di nuovi accumuli sabbiosi noti come ventagli di rotta o *washover fan*. Questi accumuli di recente formazione rappresentano l'habitat ideale per molte specie di uccelli. Ad esempio, nel sistema insulare gradese, le aree di neoformazione dei banchi attribuibili ai processi di *washover* e *progradazione di spit* sono state individuate come aree di estrema valenza per la nidificazione del Frattino (*Charadrius alexandrinus*), del Fraticello (*Sternula albifrons*), della Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus* Figura 6.3) e del Corriere piccolo (*Charadrius dubius*) (Sponza et al., 2015; Cosolo et al., 2015). A rendere queste aree particolarmente importanti per gli uccelli sono il substrato sabbioso, la bassa e scarsa copertura vegetale e il facile accesso alla risorsa trofica. La porzione vegetale è infatti dominata dalla *Cakiletea maritima* (Figura 6.4), classe vegetazionale corrispondente all'Habitat 1210 "Vegetazione annua delle linee di deposito marine" (Sponza et al., 2015).



Figura 6.3. Nido di Beccaccia di mare sui banchi



Figura 6.4 Vegetazione a cakileto che ricopre tipicamente un'area di banchi di neoformazione (giugno 2015)

#### *Misure regolamentari*

Tra le misure di conservazione adottate a favore di questi habitat e delle specie che vi nidificano, la Regione a partire dal 2014 ha precluso alcune aree alla fruizione balneare-diportistica, dal 1 maggio al 31 luglio.

Per le isole barriera vere e proprie va invece considerato un modello gestionale che tenga conto anche del loro ruolo difensivo nei confronti della laguna retrostante.

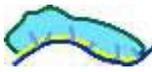
Anche in questo caso vanno in primo luogo mantenuti i processi morfodinamici che sono alla base dell'esistenza, delle caratteristiche e dell'evoluzione delle isole barriera quali:

- le correnti lungo riva
- gli apporti sedimentari provenienti dai litorali adiacenti (Lignano, banchi esterni)
- la naturale dinamicità della linea di riva
- tutela delle aree a elevata dinamicità che sono in parte assimilabili e quelle dei banchi esterni
- tutela della naturale dinamicità della bocca di Sant'Andrea

Il mantenimento di questi processi implica di evitare il ricorso a qualsiasi irrigidimento del sistema costiero con costruzioni e difese rigide sia parallele che trasversali, valutando attentamente anche eventuali interventi sul litorale di Lignano.

Secondo modelli utilizzati in letteratura possono essere proposti alcuni indicatori dello stato di conservazione delle isole barriera sia ai fini della sicurezza idraulica che della tutela degli ecosistemi:

- posizione linea di riva
- quota massima sul livello del mare
- ampiezza dell'isola barriera
- pendenza dei fondali
- bilancio sedimentario.



### 6.2.2. Barene

Gli interventi gestionali relativi alle barene possono essere distinti in due grandi categorie: **(A) il recupero morfologico di morfologie già esistenti e soggette a erosione, (B) la ricostruzione ex novo.**

#### **A ) Recupero o miglioramento di sistemi barenali già esistenti**

In un contesto evolutivo come quello della laguna di Marano e Grado sono diverse le strategie e le tecniche di intervento che possono essere proposte, sulla base della letteratura internazionale disponibile in proposito (Bettinetti et al., 1995; Cecconi et al., 1998; Scarton et al., 2000; Colenutt, 2001; Bonometto, 2003; Adnitt et al., 2007; Doody, 2008), in termini di recupero o miglioramento di sistemi barenali già esistenti. Di seguito si riassumono le caratteristiche principali di ciascuna di esse.

##### *Do nothing*

Se la barena è in una situazione tale da poter rispondere al mutare delle condizioni ambientali adattandosi e modificandosi a sua volta, la scelta di “non intervenire” (*do nothing*) può essere la più appropriata. In molti casi lasciare che i processi evolvano in modo autonomo è fondamentale, perché invece ogni intervento potrebbe rivelarsi inutile, o peggio dannoso.

##### *Favorire la sedimentazione locale*

I processi morfogenetici responsabili della formazione delle barene possono essere attivati e accelerati. Esistono numerose tecniche che mirano a ridurre la velocità delle correnti tidali alle quali è associato un certo carico sedimentario. Mediante tale azione è possibile prolungare il periodo di sedimentazione durante un ciclo tidale, con l'obiettivo di far depositare la maggior quantità possibile di sedimenti fini. Questi vengono trasportati dall'alta marea nelle aree di interesse dove, mediante strutture apposite, il riflusso viene rallentato, favorendo la loro deposizione. Una delle tecniche possibili è la piantumazione di specie alofite adatte. Altre tecniche prevedono l'uso di deflettori o barriere di varia natura e materiali; ne sono un esempio le fascinate o i *sedimentation fields* utilizzati soprattutto nel Nord Europa, le strutture in geotessile posizionate direttamente sul fondale, o le barriere frangiflutto galleggianti (McCartney, 1985; Saccomani, 2009)

##### *Apportare nuovi sedimenti attraverso ricariche*

Nei casi in cui, per differenti motivi, gli apporti sedimentari siano scarsi è possibile scegliere di intervenire con apporti di sedimento, ad esempio ricavati dal dragaggio dei canali nel bacino stesso. Nel caso, meno auspicabile, di sedimenti di provenienza esterna al bacino andrà posta particolare attenzione alla loro tipologia.

La ricarica di sedimento potrà essere di tipo diretto ossia riguardare direttamente l'area di barena, oppure indiretta ossia realizzata in aree adiacenti con l'intento di sfruttare le correnti di flusso per la redistribuzione del sedimento. Le tecniche possibili sono molteplici e la loro scelta dipende molto dalle condizioni locali. Le ricariche di tipo diretto possono prevedere l'innalzamento artificiale dell'area intertidale o di quella sub-tidale, mediante l'apporto di nuovo sedimento, fino al raggiungimento di una quota soglia oltre la quale la vegetazione può naturalmente svilupparsi e crescere. L'apporto di sedimento può essere realizzato tramite una draga che spara il composto su tutta l'area destinata alla ricarica (*rainbow discharging*) o una serie di tubazioni (*pipeline discharge*) che collegano la zona di dragaggio con quella di ricarica.

Le ricariche di tipo indiretto prevedono l'introduzione di nuovo materiale sedimentario e la sua redistribuzione, attraverso l'energia naturale del sistema. Più precisamente l'intervento consiste in una lenta ricarica (*trickle charging*) in un'unica zona, o in più punti (sulla costa, sulla/e velma/e o nella zona sub – tidale). Questi accumuli sedimentari saranno poi risospesi e presi in carico dalle correnti, che li distribuiranno in modo naturale nelle aree di interesse. È importante trovare il/i punto/i più corretto/i per il posizionamento del materiale di ricarica, ed è quindi fondamentale conoscere in modo approfondito la



batimetria e l'andamento delle correnti. Il difetto principale del metodo sono i tempi di ricarica, estremamente lunghi se paragonati al posizionamento diretto mediante pompaggio.

La ricarica lenta attraverso la colonna d'acqua (*Trickle charge via the water column*) prevede invece l'immissione di sedimenti diluiti direttamente nella colonna d'acqua (sedimenti in sospensione). Il materiale deve essere introdotto gradualmente, per evitarne la sedimentazione troppo rapida e la concentrazione in un punto del fondale.

Una variante della tecnica è l'*agitation dredging*, in cui il materiale viene mobilitato dal sito di dragaggio mediante un'azione idraulica (es. iniezione d'acqua). Questo processo utilizza grandi volumi d'acqua concentrati in getti a bassa pressione, applicati direttamente alla superficie di sedimentazione; il flusso erode il sedimento e forma una miscela acqua – sedimento sospeso. I sedimenti fangosi vengono presi in carico dalla corrente e si concentrano in un livello più denso e turbolento, posto al di sopra del fondale.

#### *Proteggere i margini*

Nel caso di azione erosiva ben individuata e direzionale quale l'azione del moto ondoso di origine naturale o provocato dai natanti, possono essere utilizzate tecniche di protezione dei margini della barena. Ne è un esempio una tecnica tradizionale molto utilizzata nelle lagune del Nord Adriatico, che prevede la posa di palificate a elementi contigui con lo scopo di difendere e consolidare il margine della barena, prima che se ne verifichi il crollo e il successivo asporto. Queste strutture vengono posizionate in aderenza ai bordi delle barene, seguendo le rientranze maggiori e rettificando i margini se troppo frammentati. La quota sommitale della palificata è in genere uguale o leggermente superiore a quella della barena. Eventuali spazi, tra palificata e margine barenale esistente, vengono colmati mediante il riporto di materiale idoneo, prelevato dai bassifondi antistanti o dai canali adiacenti.

Negli ultimi anni si è cercato di evitare le problematiche indotte da questo tipo di difese quali la riflessione del moto ondoso e la conseguente sovraescavazione del fondale adiacente, utilizzando altre tecniche. Alternative utilizzate sono le difese adattabili alla morfologia del terreno come le "burghe", o le difese distaccate che hanno lo scopo di creare una zona ad acque calme davanti al margine della barena. A seconda della tipologia e profondità del fondale adiacente (velma, piana sub-tidale o canale) e dell'energia del moto ondoso, esiste una vasta gamma di tipologie e materiali impiegabili, che va dalle fascinate in materiale legnoso alle difese galleggianti.

#### *Applicazione ai contesti evolutivi individuati*

In base alle differenti tipologie erosive individuate e descritte è possibile definire una rosa di strategie e di tecniche, che è possibile adottare per la tutela e il ripristino delle barene.

Lo schema di lavoro proposto, che associa a ogni tipologia erosiva differenti approcci e tecniche gestionali, viene descritto di seguito e sintetizzato in Tabella 6.1. Ciascuna delle tecniche proposte richiede un attento studio morfodinamico, idrodinamico e vegetazionale prima dell'eventuale intervento e un monitoraggio nella fase successiva.

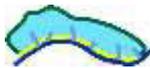


Tabella 6.1. Tabella che associa a ogni tipologia erosiva differenti approcci e tecniche gestionali.

Tipologia erosiva	Strategie	Tecniche possibili
E1	<ul style="list-style-type: none"><li>– Do nothing</li><li>– Aumentare la disponibilità di sedimento</li><li>– Favorire la sedimentazione locale</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Ricarica di sedimento diretta o indiretta in aree adiacenti</li><li>– Protezioni distaccate con creazione di aree ad <i>acque calme</i></li><li>– Piantumazioni</li></ul>
E2	<ul style="list-style-type: none"><li>– Do nothing</li><li>– Proteggere i margini dal moto ondoso diretto</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Lasciare migrare la barena</li><li>– Protezioni in aderenza</li><li>– Protezione distaccate con creazione di aree ad <i>acque calme</i></li><li>– Protezioni <i>soft</i> (fascinate, buzzoni)</li><li>– Protezioni soffolte</li></ul>
E3	<ul style="list-style-type: none"><li>– Do nothing</li><li>– Proteggere i margini dal moto ondoso diretto</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Lasciar migrare la barena</li><li>– Protezioni in aderenza</li><li>– Protezione distaccate con creazione di aree ad <i>acque calme</i></li><li>– Protezioni <i>soft</i> (fascinate, buzzoni)</li></ul>
E4	<ul style="list-style-type: none"><li>– Do nothing</li></ul>	
E5	<ul style="list-style-type: none"><li>– Impedire lo sviluppo di ulteriori interventi antropici diretti</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Vincoli alla pianificazione territoriale</li></ul>

#### *Erosione delle barene per annegamento indotto (E1)*

Questo stile evolutivo è generato da un insieme di forzanti: risalita del livello del mare, scarsa sedimentazione, alti tassi di auto-compattazione e subsidenza regionale che si traducono in subsidenza localizzata e deficit sedimentario, provocando l'annegamento localizzato o completo della barena.

Una volta verificata la reale necessità di intervento e quindi scartata la probabilità che le tendenze erosive in atto siano "cicliche" o occasionali e che in aree adiacenti non vi siano aree interessate da processi inversi (cosa che in realtà si verifica raramente nei casi in cui questa tipologia di forzante è la prevalente), è necessario agire sulla causa del problema e quindi aumentare l'apporto sedimentario.

Nei casi in cui il problema si manifesti in aree interne alla barena stessa sarà probabilmente difficile e poco opportuno intervenire con apporti diretti di sedimento in quanto troppo impattanti, soprattutto se nell'area sono presenti associazioni vegetali tipiche di barena bassa (come popolamenti a spartina). Potrà essere più facilmente scelta l'opzione di una ricarica sedimentaria in aree adiacenti (ricarica indiretta).

Nel caso si appuri che all'interno dello stesso gruppo di barene vi siano aree in accrescimento, che possano far ipotizzare un certo apporto sedimentario è possibile intervenire per favorire i processi tidali di deposizione. Ciò può essere realizzato ad esempio con opere di difesa distaccate di diverso tipo o, nel caso le batimetrie lo consentano, con piantumazioni.



### *Erosione delle barene causata da moto ondoso da vento (E2)*

Questo stile erosivo si riscontra sui margini delle barene esposte ad ampi tratti di acque libere nella direzione di provenienza dei venti dominanti (soprattutto la bora, ma anche scirocco e libeccio). L'erosione è generata dall'azione del moto ondoso, che produce l'arretramento dei margini esposti e la frammentazione delle barene. Questa tipologia è in genere caratterizzata da un'erosione asimmetrica e localizzata che coinvolge solo alcuni margini.

In molti casi si è verificato che a un significativo arretramento sul lato esposto al vento corrisponde la presenza di significative aree di accrescimento del margine sottovento, o in aree protette adiacenti con un parziale colmamento di ghebi e chiari. Nel primo caso ne risulta una migrazione della barena, con un bilancio tra aree erose e aree accresciute pressoché nullo. In questi casi, una volta appurata la mancanza di elementi rigidi o aree profonde che possono limitare i gradi di libertà, una scelta opportuna può essere quella del non intervento (*do nothing*) in quanto la barena ha mostrato di essere in grado di mantenere un proprio equilibrio dinamico.

La presenza invece di elementi rigidi che ne limitano l'adattamento o in presenza di un bilancio nel complesso significativamente negativo, una delle strategie adottabili può essere la protezione localizzata dei margini, con strutture difensive aderenti o distaccate, scelte anche in base alle batimetrie.

Alternative utilizzate sono le difese adattabili alla morfologia del terreno come le "burghe", o le difese distaccate che hanno lo scopo di creare una zona ad acque calme davanti al margine della barena. Esiste una vasta gamma di tipologie e materiali, che va dalle fascinate in materiale legnoso alle difese galleggianti, impiegabili a seconda della tipologia e profondità del fondale adiacente (velma, piana subtidale o canale) e dell'energia del moto ondoso.

Se le batimetrie dell'area adiacente sono troppo profonde le difese possono infatti indurre riflessione e sovraescavazione. In questi casi può essere più utile un ripascimento dell'area subtidale soprattutto se si è verificato che l'area adiacente sia stata anch'essa soggetta a fenomeni di erosione.

### *Erosione delle barene causata da moto ondoso da natanti (E3)*

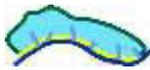
Questo stile si distingue dal precedente, perché la forzante è rappresentata dal moto ondoso generato dal transito di natanti lungo i canali lagunari navigabili. È perciò evidente che tale tipologia si sviluppi esclusivamente nelle barene adiacenti ai canali lagunari, dove i margini esposti al moto ondoso sul lato canale, mostrano un arretramento progressivo nel tempo con manifestazioni morfologiche molto simili a quelle descritte per il caso E2.

Anche il processo decisionale può quindi essere molto simile. In presenza di aree deposizionali che compensino adeguatamente quelle erosive, l'adozione della strategia del "non intervento" può essere senz'altro opportuna, con le limitazioni già esposte per la tipologia E2. In questo caso inoltre gioca a favore di questa scelta anche il fatto che l'erosione è legata a una forzante più localizzata, che tende a perdere di efficacia a una certa distanza dalla sua origine.

Nei casi di bilancio fortemente negativo o di impossibilità di adattamento del sistema, per presenza di elementi antropici o morfologici che ne limitino il grado di libertà, possono essere utilizzate protezioni dei margini in aderenza o distaccate. Quest'ultimo approccio può essere consigliato anche in corrispondenza delle grandi vie navigabili, dove avviene il transito di grandi navi.

### *Erosione delle barene causata da processi di dinamica costiera (E4)*

Questo stile evolutivo viene generato da particolari dinamiche costiere ed è stato riscontrato in un solo caso (presso la bocca tidale di Sant'Andrea). Trattandosi di dinamiche evolutive molto rapide e dipendenti da fattori esterni all'ambito lagunare propriamente detto, è necessario che esse vengano garantite nel loro massimo grado di libertà, senza interventi che possano modificare o irrigidire la dinamica costiera.



#### *Perdita di barene per interventi antropici diretti (E5)*

Non si tratta di un vero e proprio stile evolutivo, ma piuttosto di azioni antropiche dirette (bonifiche, creazione di casse di colmata, chiusura di valli da pesca, costruzione di argini di conterminazione), che determinano l'eliminazione di porzioni o di interi corpi barenali. È evidente che in questo caso vi sia una necessità di maggior tutela a livello di gestione territoriale per evitare ulteriori perdite.

#### **B) Costruzione di barene ex novo**

La ricostruzione integrale di aree a barena può essere ritenuta un intervento positivo per la salvaguardia delle dinamiche morfologiche e idrauliche della laguna. Tuttavia, si pone l'esigenza di valutare le priorità e le modalità di intervento, per la localizzazione e costruzione di nuovi sistemi di barene, non solo in considerazione delle stesse quali aree emerse e intertidali a beneficio degli habitat, ma anche quali entità morfologiche con un fondamentale ruolo per il bilancio sedimentario e il mantenimento della laguna. L'area d'intervento più idonea va valutata caso per caso tenendo conto delle condizioni morfologiche e idrodinamiche del bacino.

Riportiamo di seguito alcune indicazioni utili in termini generali.

#### *Finalità*

La costruzione di barene ex-novo deve essere principalmente finalizzata al ripristino morfologico ed ecologico, o non alla stabilità strutturale, a tal fine devono essere scelte aree e modalità di intervento. Può essere valutata la costruzione di barene ritenute utili al fine di limitare i processi erosivi in aree adiacenti o il trasporto di sedimenti verso i canali e verso le bocche.

#### *Aree di intervento*

La ricostruzione deve riguardare in preferenza aree dove le barene erano già presenti nel passato e deve tener conto delle necessità di dragaggio dei canali a compatibilità dei sedimenti; È preferibile che la ricostruzione avvenga in aree già costituite da piane tidali (tra 0 e -0.5m) e comunque con fondali non troppo approfonditi. La collocazione delle nuove barene in zone della laguna dove possano essere ritenute utili al fine di limitare i processi erosivi in aree adiacenti o il trasporto dei sedimenti verso i canali e verso le bocche dovrà essere opportunamente valutata, anche previa accurata verifica modellistica.

#### *Morfologia e quote*

L'area di sversamento deve rispettare il più possibile la morfologia preesistente senza interrompere canali o ghebi e modificare in maniera sostanziale il flusso e riflusso mareale, a meno che la modifica non sia opportunamente progettata e finalizzata agli scopi precedentemente esposti.

La collocazione del sedimento deve rispettare il più possibile le caratteristiche morfologiche funzionali delle barene che già esistono in aree adiacenti o che si trovano in aree della laguna simili dal punto di vista geomorfologico, idraulico e fisiografico.

La morfologia risultante deve essere quanto più possibile articolata sia in termini planimetrici che altimetrici per garantire una buona resa paesaggistica e di ripristino morfologico ed ecologico.

Le quote medie (da prevedere dopo che è avvenuto una naturale prima compattazione) devono essere comprese tra 0.30 e 0.60m sul l.m.m., possono essere previste aree a quote più elevate per scopi faunistici (si veda scheda dedicata) e aree a quote ridotte per favorire l'insediamento di ecosistemi di barena bassa (popolamenti di spartina).



### *Provenienza dei sedimenti*

Di particolare interesse risulta essere la pratica tradizionale di collocare i sedimenti dragati dai canali lungo i bordi degli stessi; essa infatti in alcuni casi sembra aver dato risultati positivi in termini morfologici e funzionali (barene a lato del canale di Belvedere, barena a lato dell'Allacciante di Sant'Andrea) (Bezzi et al., 2015). tale soluzione è tesa anche al rispetto di un principio di prossimità che vada nella direzione di mimare i processi naturali e di favorire al massimo la sostenibilità degli interventi.

Questa pratica risulta attualmente compatibile con la necessità di dragaggio dei canali (si veda programmazione regionale a riguardo) e con le indicazioni di ARPA per il riutilizzo dei sedimenti all'interno del medesimo corpo idrico o comunque con qualità chimico fisiche simili tra area di provenienza e area di sversamento (questa tematica sarà comunque più ampiamente affrontata all'interno del protocollo per la gestione dei sedimenti in laguna in corso di redazione da parte del Gruppo di Lavoro costituito da Regione FVG).

### *Protezioni rigide*

Esperienze a livello internazionale hanno mostrato la scarsa funzionalità in termini geomorfologici ed ecologici di metodologie che prevedono lo sversamento di sedimento in aree conterminata portando le quote a livello intertidale alto, in quanto tendono a favorire la formazione di superfici consolidate in cui la marea non riesce a indurre la formazione di una rete di ghebi (PWA 1994; Atkinson et al. 2001).

Pertanto vanno ridotte al minimo protezioni rigide se non lungo i canali lagunari a intensivo transito di natanti soprattutto di grandi dimensioni, dove la tecnica più idonea va però adeguatamente individuata e progettata, in modo da evitare quanto più possibile gli effetti perturbativi tipicamente indotti dalle opere rigide (erosione per riflessione del moto ondoso).

### *Tecniche di sversamento*

Andranno adottate soluzioni tecniche anche sperimentali adatte a minimizzare gli impatti sui sistemi morfologici ed ecologici adiacenti l'area di intervento e con miglior resa ai fini di un reale ripristino funzionale ed ecologico.

### *6.2.3. Piane tidali*

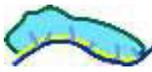
Per quel che riguarda la difesa e la ricostruzione delle piane intertidali (velme) la letteratura presenta casi studio molto ridotti rispetto al caso delle barene.

Uno dei principali problemi da affrontare nella ricostruzione di velme è rappresentato dall'utilizzo anche di materiale fine coesivo (argilloso), utilizzo che si presenta più complesso dal punto di vista tecnico rispetto alle più comuni ricariche di sabbia e silt (Atkinson et al., 2001). Il sedimento coesivo infatti richiede più tempo per stabilizzarsi e raggiungere una condizione di equilibrio con le condizioni al contorno (maree e onde). La stabilizzazione comprende il drenaggio, il consolidamento ma anche l'azione biologica da parte di microorganismi e invertebrati. È frequente, proprio per questo motivo, che i sedimenti dragati e stoccati nell'area di deposito vengano confinati per impedire la loro dispersione durante il periodo di consolidamento.

Per ovviare a questi problemi è stato sperimentato anche l'utilizzo di fluidi ad alta densità senza aggiunta di acque per la fase di deposito (Atkinson et al., 2001).

La ricostruzione di piane intertidali è stata realizzata sia negli Stati Uniti (Ray, 2000) sia in Inghilterra (Atkinson et al., 2001, Bolam & Whomersley, 2005). Gli studi di monitoraggio di questi interventi non sono molti e si sono focalizzati sulle modifiche dei sedimenti nel tempo e sulla ricolonizzazione da parte da parte delle macrofaune (Bolam & Whomersley, 2005).

In laguna di Venezia la ricostruzione di velme e di cosiddetti sovralti è stata fatta per scopi di miglioramento idraulico e non di ripristino ecologico, reflueno materiale sabbioso fino a raggiungere una



quota iniziale attorno al medio mare, prevedendo una stabilizzazione spontanea successiva alla quota di -0.2 / -0.4m a seconda dell'esposizione al moto ondoso. Su alcune di queste aree è stata eseguita una piantumazione di fanerogame.

Le strategie da adottare nel caso della laguna di Marano e Grado sono assimilabili a quelle già indicate per le barene.

- *Do nothing*: la scelta di “non intervenire” può essere la più appropriata, soprattutto in seguito a un’attenta valutazione del rapporto costi / benefici.

- *Favorire la sedimentazione locale*: come nel caso delle barene possono essere utilizzate diverse tecniche che mirano a ridurre la velocità delle correnti tidali o l’energia del moto ondoso favorendo la sedimentazione.

- *Apporto di sedimento*: nei casi di scarso apporto sedimentario naturale è possibile scegliere di intervenire con apporti di sedimento, ad esempio ricavati dal dragaggio dei canali nel bacino stesso. Nel caso, meno auspicabile, di sedimenti di provenienza esterna al bacino andrà posta particolare attenzione alla loro tipologia. Le tecniche adottabili sono quelle già indicate per le barene.

La ricarica sedimentaria per il ripristino delle aree intertidali in laguna di Marano e Grado dovrà, in una prima fase, essere considerata come un’attività di tipo sperimentale che andrà attentamente monitorata nelle sue componenti morfologiche, fisiche e biologiche. Pur presentando minori problematiche dal punto di vista paesaggistico e del corretto sviluppo della vegetazione rispetto alle barene, un corretto intervento realizzato anche a fini ecologici e non solo idraulici rappresenta un valore aggiunto irrinunciabile per un sito così importante dal punto di vista ambientale.

Le principali finalità di questo tipo di interventi sono descritte di seguito.

- Ripristino di quote intertidali laddove i fondali lagunari si presentino maggiormente erosi: questi casi devono essere attentamente valutati nel rapporto costi / benefici, infatti laddove gli approfondimenti siano di entità notevole l’apporto sedimentario richiesto può essere troppo consistente per riuscire a raggiungere quote adeguate e va pertanto valutato anche in base alle disponibilità di sedimento da dragaggio.

- Ripristino in aree adiacenti a barene: il ripristino di piane intertidali può essere un valido ausilio per limitare l’erosione delle barene adiacenti e per fornire una rinnovata fonte sedimentaria per la loro ricarica; in questi casi l’apporto di sedimento sulla piana intertidale può anche essere considerata temporaneo e una sua rimobilizzazione non deve essere valutata negativamente, particolare importanza in questi casi uno studio modellistico previsionale per evitare che l’area prescelta contribuisca all’interramento di canali adiacenti.

- Ripristino in aree di particolare interesse avifaunistico: trattandosi di aree molto importanti per l’alimentazione dell’avifauna limicola, il ripristino di piane tidali potrà essere intrapreso in aree le cui caratteristiche siano indicate come ottimali dagli studi e monitoraggi avifaunistici eseguiti in laguna, ad esempio in aree adiacenti ai siti di nidificazione. In questo caso maggior attenzione andrà posta nella scelta della tipologia di sedimenti al fine di ottenere, per quanto possibile, un’ottimale ricolonizzazione da parte delle macro faune bentoniche.

- Ripristino integrato di sistemi velma / barena: questa tipologia di intervento appare spesso come la più auspicabile proprio per la naturale connessione morfologica e funzionale delle due morfologie.



#### 6.2.4. Valli da pesca

Gli interventi a tutela e miglioramento della attuale situazione delle valli da pesca possono essere così sintetizzati:

- Ripristino delle arginature delle valli a maggior rischio di scomparsa, in particolare valle Mezzano, valle Pedoli, valle Ghebo Vacche, valle Ara Storta, valle del Moro 1 e 2 (valle del Moro è considerata comprensiva anche di valle Colussi) e delle altre realtà vallive che emergeranno dall'attività di verifica.
- Per il ripristino delle arginature è auspicabile intervenire con materiale di origine locale, ad esempio con i sedimenti di dragaggio dei canali lagunari.
- Ripristino della struttura interna in particolare dei dossi fangosi e delle barene non vegetate di bordo canale all'interno delle valli da pesca, derivanti dallo scavo ordinario dei canali interni, in quanto ambienti importanti per la nidificazione di specie di uccelli prioritarie.
- Ripristino del controllo dei livelli idrici.
- Elaborazione e promozione di un nuovo modello di gestione delle valli da pesca, capace di coniugare gli aspetti produttivi con i valori e le emergenze naturalistiche presenti.

### 6.3. Indicazioni gestionali per la tutela dell'avifauna

Lo Studio si pone l'obiettivo di contrastare e, ove possibile, ridurre l'erosione delle forme lagunari intertidali e di conservare l'ecosistema lagunare, consentendone un uso sostenibile. L'analisi e le indicazioni qui di seguito riportate sono rivolte al raggiungimento di questo obiettivo, con particolare attenzione alla conservazione e alla tutela delle specie ornitiche, a completamento e integrazione di quanto suggerito dalle indicazioni a più stretto carattere morfologico.

#### 6.3.1. Analisi di contesto

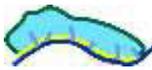
Il complesso di zone umide tra la foce del fiume Timavo e il delta del Po, è un'area di grande importanza per la nidificazione e lo svernamento di molte specie di uccelli acquatici, in particolare laro-limicoli, non solo nel contesto italiano ma dell'intero Mediterraneo (Guzzon et al., 2001).

La laguna di Marano e Grado è il più orientale fra i sistemi lagunari dell'Alto Adriatico e il più settentrionale del Mar Mediterraneo. Il dominio mareale porta alla formazione di ambienti di estremo valore ecologico, come le velme, distese fangose o sabbiose emergenti durante la bassa marea, e le barene, poste nella fascia intertidale alta.

L'avifauna rappresenta uno degli elementi di maggiore rilevanza naturalistica (Regione FVG 2012a), tanto per numero di specie segnalate, oltre 300, che per numero di individui. Ad oggi, 135 sono le specie di uccelli riportate nel Formulario Standard del Sito ZSC/ZPS IT3320037 Laguna di Marano e Grado, molte delle quali di Allegato 1 alla Direttiva 2009/147/CE.

Le barene, le velme, i banchi sabbiosi esterni e un peculiare e antico sistema di valli da pesca, sostengono questa ricca avifauna; da citare, tra i nidificanti, la Sterna comune (*Sterna hirundo*), il Fraticello (*Sternula albifrons*), il Cavaliere d'Italia (*Himantopus himantopus*), la Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus*), la Pettegola (*Tringa totanus*), la Volpoca (*Tadorna tadorna*); tra gli svernanti il Chiurlo maggiore (*Numenius arquata*), la Pivieressa (*Pluvialis squatarola*), il Piovanello pancianera (*Calidris alpina*).

Attualmente il regime di proprietà nella laguna è suddiviso in aree del demanio pubblico e marittimo di competenza amministrativa regionale, aree di proprietà comunale (incluse alcune valli da pesca), aree di proprietà privata (soprattutto valli da pesca) e aree del demanio statale.



Una delle componenti morfologiche più peculiari della laguna di Marano e Grado è data proprio dalla storica presenza delle valli da pesca, bacini arginati caratterizzati da una netta separazione dal bacino lagunare soggetto a marea. Nell'Adriatico settentrionale ne sono presenti circa 22.000 ha di valli arginate; costituiscono il più importante sistema vallivo d'Italia, tra i più importanti d'Europa e del Mediterraneo (Bon & Scarton, 2009), di cui 1700-1800 ha in laguna di Grado e Marano.

La gestione di molte di queste valli, in particolare quelle più piccole, non è più economicamente sostenibile. Talvolta gestite con conduzione familiare e non rivolta al mercato, spesso in condizione di abbandono effettivo e in via di degrado, le valli sono rilevanti segni del paesaggio tradizionale, piccoli ecosistemi ricchi di biodiversità (Regione FVG 2012c). Giocano, infatti, un ruolo ecologico importante. Purtroppo, l'abbandono della vallicoltura impoverisce queste aree di ambienti adatti alla nidificazione di specie prioritarie. In un'ottica strategica, vanno quindi attuate azioni di conservazione che favoriscano la riproduzione degli uccelli acquatici in ambito vallivo e va ricercata una gestione sostenibile delle valli da pesca che consideri anche le esigenze ecologiche degli uccelli.

Negli ultimi decenni barene e velme (Fontolan et al., 2012; Bezzi, 2013), e argini vallivi hanno subito una forte erosione, con perdita e alterazione di habitat specifici e di aree utili alle specie ornitiche sia in fase di nidificazione che di svernamento (Sponza et al., 2009; Regione FVG, 2015a; Regione FVG, 2015b).

La difesa del valore ecologico della laguna non può quindi prescindere dalla conservazione e dal ripristino delle barene, delle velme e delle stesse valli da pesca. Interventi di salvaguardia strutturale della laguna sono quanto mai necessari e urgenti e porterebbero a positive ricadute sia a livello faunistico che floristico. Dal 2012 la gestione dei dragaggi dei canali lagunari è rientrata nelle competenze regionali, dopo anni di gestione emergenziale. L'Amministrazione regionale ha quindi la possibilità di indirizzare la pratica dell'ordinaria manutenzione dei canali lagunari a finalità di ripristino morfologico e naturalistico.

### 6.3.2. Minacce

*Innalzamento del livello del mare con conseguente diminuzione di peculiarità morfologica.* Al degrado delle morfologie lagunari, velme, barene e arginature vallive, consegue la perdita di habitat e di aree idonee alla nidificazione, alla sosta e all'alimentazione degli uccelli acquatici. Se per la sosta e la nidificazione è fondamentale la presenza delle barene, dei banchi sabbiosi e degli ambienti vallivi, per l'alimentazione si sottolinea l'importanza dei canali lagunari, ma, soprattutto, dei fondali che emergono durante la bassa marea, velme o piane di marea, identificati come ambienti prioritari ai sensi della Direttiva 92/43/CEE (Habitat 1140).

*Declino generalizzato della vallicoltura.* L'abbandono dell'ambiente vallivo determina: *i)* assenza di gestione e manutenzione dei canali interni, con perdita di superfici emerse e sviluppo della vegetazione sulle barene e isole presenti in valle; *ii)* semplificazione del regime idraulico della valle; *iii)* banalizzazione ambientale e insediamento del Gabbiano reale (*Larus michahellis*). Ne consegue la perdita di superfici emerse e di aree adatte alla nidificazione delle specie di uccelli acquatici prioritarie per la conservazione. Diversamente, una gestione dei livelli idrici delle realtà vallive ancora attive, non sempre attenta agli aspetti naturalistici (caratteristico l'innalzamento del livello idrico interno alla valle in periodo primaverile-estivo) incide fortemente sulla possibilità di insediarsi e nidificare con successo delle specie più legate a questo ambiente, come la Sterna comune (*Sterna hirundo*) e il Fraticello (*Sternula albifrons*). Ciò condiziona negativamente anche il successo riproduttivo del Cavaliere d'Italia (*Himantopus himantopus*) e incide sul mancato insediamento di specie, come il Beccapesci (*Sterna sandvicensis*) e il Gabbiano corallino (*Larus melanocephalus*), caratterizzanti le zone umide dell'Alto Adriatico.

*Disturbo antropico nelle spiagge e nei banchi sabbiosi litoranei.* Il disturbo antropico, legato al turismo diportistico- balneare, nei banchi sabbiosi esterni in periodo primaverile- estivo ha inciso fortemente, a



partire dagli anni ottanta del secolo scorso, sul crollo della popolazione di Fraticello (*Sternula albifrons*), dalle 200 coppie nidificanti negli anni ottanta, alle 20-30 coppie del 2008, a un minimo di 63 coppie nel 2015, così come al crollo di altre specie, come il Fratino (*Charadrius alexandrinus*), dalle 100 coppie nidificanti negli anni ottanta, a meno di 10 coppie nel 2008, alle 2-4 coppie rilevate nel 2015 (Utmar et al. 2007, Sponza et al. 2009, Regione FVG 2015a, Regione FVG 2015b).

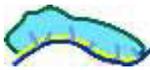
### 6.3.3. Indicazioni gestionali

#### Banchi sabbiosi

- Precludere l'accesso ai cordoni sabbiosi litoranei, ove nidifica il Fraticello (*Sternula albifrons*), il Fratino (*Charadrius alexandrinus*) e la Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus*), e ad altre zone ritenute idonee alla nidificazione di queste specie.
- Prevedere azioni di gestione attiva, come il taglio della vegetazione, la profilatura del suolo/substrato in periodo primaverile per mantenere l'habitat adatto alla nidificazione del Fraticello (*Sternula albifrons*) (Scarton & Montanari, 2015; Regione FVG, 2015b). Nella scelta del sito riproduttivo da parte del Fraticello (*Sternula albifrons*) la copertura vegetazionale e la presenza del Gabbiano reale (*Larus michahellis*) incidono negativamente. L'habitat riproduttivo è, infatti, quello tipico dei substrati sabbiosi poco evoluti, di recente formazione, a scarsa copertura vegetale, in stretta prossimità dell'acqua (Snow & Perrins, 1998; Gustin et al., 2010).
- Monitorare con regolarità i banchi sabbiosi esterni e la relativa linea di riva, in modo da poter rilevare e quantificare efficacemente il rapido *trend* evolutivo che caratterizza questi ambienti. Dal punto di vista gestionale, l'estrema dinamicità e mobilità di queste aree, fondamentali per la nidificazione del Fratino (*Charadrius alexandrinus*), del Fraticello (*Sternula albifrons*) e della Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus*) devono essere tenute in debita considerazione quando si pianificano le necessarie misure di conservazione, soprattutto per quelli che sono i tempi che intercorrono tra la fase valutativa/decisionale e quella attuativa.

#### Barene-velme

- Nella necessità di tutelare e ripristinare le morfologie lagunari tipiche, privilegiare la costruzione o ricostruzione di barene nelle vicinanze delle più importanti velme o piane di marea (Casoni Sant'Andrea- Toppi di Punta Grossa, fondale a Nord Allacciante Sant'Andrea, Fontane, Anfora Nord, fondale della Gran Chiusa, fondale delle Oche, fondale Nassion, fondale a Nord di Barbana, fondale Cantariga- Barena Simonetti). La creazione di idonee aree di sosta di alta marea e di nidificazione nelle vicinanze delle principali zone di alimentazione è di estrema rilevanza per la conservazione di molte specie di uccelli acquatici, sia svernanti che nidificanti (Bertolero et al., 2005; Paiva et al., 2006; Rogers et al., 2006; Campomori, 2008).
- Laddove possibile, prediligere barene di maggiori estensioni, già utilizzate dai limicoli come *roost* di alta marea (Allacciante di Sant'Andrea, Toppi di Punta Grossa, Longhe, Montaron- Fondale delle Oche, Isole della Gran Chiusa, Valli Rotte, Tapo dell'Uomo morto). In quest'ottica si potrebbe pensare di estendere la barena artificiale nota come "Trincea" o "Allacciante di Sant'Andrea" in laguna di Marano, proprio per favorire l'insediamento riproduttivo delle specie di uccelli caratterizzanti l'ambiente di barena. Di regola, maggiore è l'estensione maggiore è l'attrattività del sito sia per le specie nidificanti sia per la formazione del *roost* nei limicoli svernanti (Peters & Otis, 2007; Scarton et al., 2013).
- Nella ricostruzione delle barene agire sui profili altimetrici 1) in modo che vi siano zone con quote di sicurezza per la nidificazione degli uccelli e 2) per favorire la serie e la mosaicatura dei diversi habitat, in particolare chiari, "ghebi", distese di alofite, superfici nude. La copertura vegetazionale, sia in senso



positivo che negativo, è determinante per l'insediamento di molte specie di uccelli acquatici, seguita per importanza dalla copertura di piante alofile e dalla presenza di chiari, pozze e ghebi (Fasola & Canova, 1991; Scarton et al., 2013). Su 75 barene artificiali analizzate in laguna di Venezia, la porzione coperta da vegetazione si assestava in media al 54.5%, le parti nude prive di vegetazione al 31.6%, mentre il 13.9% era occupato da pozze, chiari e ghebi, e aree marginali erose (Scarton et al., 2013).

- Pianificare all'interno della laguna una barena/isola presso la Bocca di Sant'Andrea, zona Casoni Sant'Andrea - Toppi di Punta grossa, a substrato sabbioso, come possibile sito di nidificazione per Fratino (*Charadrius alexandrinus*) e Fraticello (*Sternula albifrons*), alternativo alla nidificazione sui banchi sabbiosi. Si tratta di una misura potenzialmente utile per contrastare e compensare il disturbo antropico sui banchi sabbiosi e per evitare fenomeni naturali come la sommersione dei nidi (Scarton 2008, Scarton et al. 2013). Potrebbe favorire, inoltre, l'insediamento di altre specie, come Beccapesci (*Sterna sandvicensis*) e Gabbiano corallino (*Larus melanocephalus*), che al momento non nidificano.
- Mantenere nel tempo nelle barene di neo- costruzione superfici non vegetate, importanti per la nidificazione di specie prioritarie come Fraticello (*Sternula albifrons*), Fratino (*Charadrius alexandrinus*) e Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus*). La gestione attiva, come il taglio della vegetazione, la profilatura del substrato e l'apposizione di nuovi sedimenti appena dragati andrebbe eseguita ad intervalli regolari per mantenere il mosaico di habitat adatti e per mantenere elevato il valore ecologico delle barene (Scarton & Montanari, 2015). Al pari, la costruzione di dossi con quote più elevate può incrementare la diversità e il ruolo ecologico delle barene stesse.
- Prevedere l'apporto, in determinati e localizzati tratti delle superfici nude delle barene, di sedimenti costituiti da prevalenti strati di conchiglie e/o sabbia a granulometria grossolana, nel rispetto della normativa vigente. L'apporto di ciottolame e conchiglie rallenta la crescita della vegetazione e costituisce un valido substrato per la nidificazione della Sterna comune (*Sterna hirundo*), del Fraticello (*Sternula albifrons*) del Fratino (*Charadrius alexandrinus*) e della Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus*) (Bonometto, 2015; Regione FVG, 2015a; Regione FVG, 2015b).
- Intervenire sui margini delle barene con soluzioni che ripristinino ed estendano le difese naturali; riportare le velme a quota consona, con protezioni che favoriscano le acque calme a ridosso delle barene (Bonometto 2015). La presenza nell'intorno delle barene di velme e bassi fondali, è importante per l'alimentazione di limicoli, sterne e gabbiani. I fattori selettivi che possono determinare l'uso dei roost (dormitori di alta marea) su scala annuale sono: i) l'estensione dell'area utilizzata come roost; ii) la posizione (distanza dalle zone di alimentazione); iii) il tipo di substrato; iv) l'aspetto ovvero il colore di fondo; v) la vegetazione, ovvero la capacità del roost di fornire una visione dell'ambiente priva di ostacoli (Luis et al., 2001; Dias et al., 2006; Rogers et al., 2006; Peters & Otis, 2007). Vari studi suggeriscono che la scelta del roost nei limicoli è influenzata dalla sua estensione, quindi dalla capacità di ospitare grandi numeri di uccelli, dalla vicinanza alle aree di alimentazione, dal substrato e dalla fisionomia del territorio (Rogers et al., 2006; Peters & Otis, 2007).
- L'Habitat 1140, ovvero le distese fangose o sabbiose emergenti durante la bassa marea, va preservato e laddove necessario ricostruito. Sono fondamentali aree di alimentazione per molte specie di uccelli acquatici sia in fase di svernamento che di nidificazione (Casoni Sant'Andrea- Toppi di Punta Grossa, fondale a Nord Allacciante Sant'Andrea, Fontane, Anfora Nord, fondale della Gran Chiusa, fondale delle Oche, fondale Nassion, fondale a Nord di Barbana, fondale Cantariga- Barena Simonetti). Negli interventi di ricostruzione va prestata debita attenzione all'interfaccia velma-barena, con profili altimetrici il più possibile prossimi naturali. Si ritiene, inoltre, fondamentale conservare nelle principali core area di alimentazione degli uccelli limicoli la naturale componente bentonica, limitando gli interventi antropici che possono avere un impatto sulla struttura del substrato (Sponza et al., 2009).

#### Valli da pesca

- Monitorare lo stato delle valli da pesca dal punto di vista strutturale, in particolare rispetto allo stato delle arginature di conterminazione, morfologico, naturalistico e produttivo.



- Ripristinare, con i sedimenti di dragaggio dei canali lagunari, le arginature delle valli a maggior rischio di scomparsa, in particolare valle Mezzano, valle Pedoli, valle Vacche, valle Ara Storta, valle Moro 1 e 2 (valle Moro 2 qui considerata comprensiva anche di valle Colussi) e delle altre realtà vallive che emergeranno dall'attività di censimento e verifica.
- Ripristinare i dossi fangosi e le barene non vegetate di bordo canale all'interno delle valli da pesca, derivanti dallo scavo ordinario dei canali interni, in quanto ambienti importanti per la nidificazione di specie di uccelli prioritarie.
- Elaborare e promuovere un nuovo modello di gestione delle valli da pesca, capace di coniugare gli aspetti produttivi con i valori e le emergenze naturalistiche presenti.

#### *Pianificazione*

Come riportato e sottolineato da Scarton et al. (2013) per la laguna di Venezia, la ricostruzione delle morfologie lagunari può essere considerata una valida misura di compensazione ambientale, in accordo con le indicazioni della Direttiva Habitat (Palerm, 2006; Morris & Gibson, 2007; European Commission, 2011; Morris, 2011).

Le linee guida qui descritte darebbero modo di completare la pianificazione di settore delle aree Natura 2000, delle aree naturali protette e della gestione faunistica, elemento indispensabile per la tutela ambientale. Nondimeno, queste linee guida sono coerenti e rappresentano un'ottima base per gli interventi di manutenzione e di ripristino degli habitat vallivi.

### **6.4. Necessità di ampliamento della base conoscitiva e indicazioni per un piano di monitoraggio permanente**

Le analisi effettuate ai capitoli 3 e 4 e le indicazioni gestionali riportate nel presente capitolo fanno emergere come in alcuni casi vi siano ampi margini di miglioramento della base conoscitiva per quel che riguarda gli aspetti geomorfologici, sedimentologici e idrodinamici della laguna.

#### *6.4.1. Banchi e isole barriera*

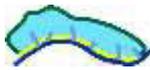
Le rapide modificazioni cui i banchi e le isole barriera sono soggetti fanno sì che sia necessario un continuo monitoraggio della morfologia delle superfici emerse e della linea di riva (con rilievo Lidar e /o aerofotogrammetrico di precisione) e della spiaggia sottomarina (rilievo batimetrico).

La disponibilità di modelli tridimensionali del terreno a cadenza temporale sufficientemente stretta consentirebbe di monitorarne l'evoluzione nel tempo e di verificare l'insorgere di eventuali criticità. Rilievi ad hoc post mareggiata offrirebbero inoltre la possibilità di indagare la capacità di autoriparazione delle morfologie e la possibile applicazione di modelli di vulnerabilità.

Vanno inoltre indagate le relazioni tra la dinamica evolutiva, l'innalzamento del livello del mare e il regime di moto ondoso; sono pertanto necessarie l'acquisizione di dati anemometrici, ondametrici e mareografici e l'applicazione di modelli di generazione del moto ondoso al largo e propagazione sottocosta.

#### *6.4.2. Barene*

Il dato dell'estensione delle barene e quindi della loro evoluzione nel tempo in termini di superfici perse e guadagnate è, come già detto, attualmente limitato a tre momenti temporali: 1954, 1990, 2006.



L'interpretazione delle ortofoto disponibili consente inoltre di limitare l'analisi alla sola estensione delle barene e non permette valutazione alcuna rispetto all'evoluzione delle quote e delle relazioni tra tasso di sedimentazione e innalzamento del livello del mare. L'unico dato disponibile, al momento, per l'analisi delle quote delle barene è il LIDAR del 2008 – 2010, realizzato e gentilmente messo a disposizione dalla Protezione Civile Regionale, i suddetti dati in ogni caso non sono stati sottoposti a procedure di collaudo e presentano alcune problematiche.

Il dato attuale relativo all'estensione e all'evoluzione delle barene potrà essere aggiornato grazie alle foto aeree più recenti (es. AGEA 2014). Ulteriori rilievi Lidar sono auspicabili per poter eseguire un confronto anche sull'evoluzione altimetrica, per la stessa ragione rilievi topografici e aerofotogrammetrici di precisione in aree campione saranno utili per ottenere dati sui tassi di sedimentazione, auto-compattazione e subsidenza relativi alle barene.

#### 6.4.3. *Velme*

Le velme, a differenza delle barene, non sono sempre rappresentate da una morfologia ben definita ed è pertanto difficile avere un'evidenza del loro stato di qualità dal punto di vista geomorfologico; la conoscenza della loro distribuzione e morfologia nel passato è affidata sostanzialmente alle sole due carte batimetriche e disposizione (1964 e 2009).

La carenza conoscitiva appena citata, non è ovviamente colmabile per il passato ma dovrebbe essere invece colmata per monitorare l'evoluzione delle velme nel futuro. Uno degli strumenti per la loro mappatura è rappresentato dal rilievo batimetrico in acque basse, oppure da un rilievo LIDAR realizzato in condizioni di bassa marea sizigiale che consenta di rilevarle come aree emerse.

Relativamente alle cause dell'erosione e alle dinamiche di risposta ai cambiamenti climatici e antropici del passato e attuali va sicuramente ampliata la ricerca sperimentale con misure in situ, campionamenti per analisi di facies della stratigrafia recente, analisi dei sedimenti.

#### 6.4.4. *Valli da pesca*

Viste le attuali carenze conoscitive è necessario censire e monitorare lo stato delle valli da pesca dal punto di vista strutturale, in particolare rispetto allo stato delle arginature di conterminazione, morfologico, naturalistico e produttivo.

#### 6.4.5. *Subsidenza*

Da ultimo, ma non in termini di importanza, la subsidenza rappresenta un fenomeno di estrema importanza la cui conoscenza attuale è del tutto insufficiente per una corretta quantificazione sia spaziale che temporale.

#### 6.4.6. *Monitoraggio*

Il monitoraggio rappresenta una necessità imprescindibile della gestione attuale e futura della laguna

Il monitoraggio ha i seguenti obiettivi:

- colmare attuali lacune di dati (geomorfologici, idraulici e sedimentologici) e relativi alla subsidenza;
- seguire l'evoluzione geomorfologica, idraulica e sedimentologica della laguna;
- seguire l'evoluzione dei processi fisici al contorno (maree, dati meteo, torbidità);
- seguire e valutare l'efficacia degli interventi.



Le azioni di monitoraggio si inquadrano nell'ambito dell'azione MR1 Monitoraggio dell'evoluzione del quadro geomorfologico e idrografico del Piano di Gestione. Esse possono essere così riassunte:

- Monitoraggio dell'evoluzione morfologica e sedimentaria dei banchi sabbiosi esterni: verifica periodica della loro estensione (da foto area) e delle loro morfologia (ripetizioni di transetti topografici o voli LIDAR), ripetizione nel tempo di profili batimetrici a mare.
- Isole barriera: monitoraggio della linea di riva e dei fondali antistanti.
- Barene: verifica periodica della loro estensione (da foto area) su tutta la laguna e istituzione di punti e transetti di controllo per la verifica dell'evoluzione in senso verticale (relazione tra tasso di sedimentazione, costipamento e innalzamento del livello del mare) e la valutazione dell'erosione dei margini (tassi di erosione).
- Monitoraggio dell'evoluzione della batimetria dei canali e dei fondali lagunari.
- Istituzione di una rete di monitoraggio della subsidenza.
- Monitoraggio mareografico e idraulico: mantenimento e/o ripristino delle stazioni mareografiche attualmente esistenti, misure di corrente per periodi sufficientemente lunghi in un numero adeguato di punti interni alla laguna e alle bocche.
- Monitoraggio delle caratteristiche sedimentologiche dei fondali, anche utilizzando la rete di punti già istituita da ARPA ma implementando la distribuzione spaziale e migliorando l'output analitico dal punto di vista sedimentologico.
- Misura delle portate fluviali sia liquide che solide.
- Misura delle portate sia liquide che solide in corrispondenza delle bocche lagunari.
- Monitoraggio della subsidenza.
- Monitoraggio del bilancio sedimentario della laguna.

Accanto a ciò va prevista un'azione di **monitoraggio degli interventi di ripristino / ricarica delle barene e dei fondali (multidisciplinare)**. Essa appare di estrema importanza scientifica e gestionale e non può essere in alcun modo trascurata come finora è avvenuto in numerosi casi che avrebbero rappresentato preziose occasioni per implementare la conoscenza delle dinamiche in atto e fornire preziose indicazioni gestionali.

Dal punto di vista morfologico e idraulico il monitoraggio dovrà comprendere:

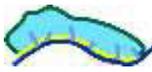
- Monitoraggio geomorfologico e topografico delle strutture morfologiche per verificare le modificazioni (erosione, deposito, compattazione) che subisce il materiale depositato e il fondale lagunare adiacente e verificare la formazione di eventuali morfologie interne alla barena (ghebi, chiari, ecc.).
- Monitoraggio dei tassi di sedimentazione sui fondali e sui canali adiacenti.
- Acquisizione di parametri fisici dell'acqua e del sedimento in relazione alle necessità di monitoraggio degli habitat (livello dell'acqua, correnti, salinità ecc., parametri granulometrici dei sedimenti).

#### 6.4.7. Banche dati

Sarebbe opportuna la realizzazione di una banca dati in GIS che comprenda tutti i dati geomorfologici, topografici, batimetrici e sedimentologici finora disponibili, ampliabile anche con altri dati afferenti alle altre discipline.

### 6.5. Prime indicazioni per un disciplinare per la movimentazione di sedimenti in laguna

Principi base di gestione dei sedimenti in laguna finalizzati alla conservazione e /o al miglioramento del suo assetto idraulico e morfologico



Le analisi realizzate nell'ambito del presente *Studio* hanno evidenziato un deficit sedimentario che, accompagnato all'innalzamento del livello del mare (si veda analisi a cura del gruppo di lavoro UniUD) e a impatti antropici di difficile quantificazione (ad esempio la diffusa molluschicoltura) risulterebbe essere il principale responsabile delle trasformazioni morfologiche in atto.

Una gestione sostenibile dei sedimenti all'interno della laguna appare essere quindi un elemento necessario per limitare, per quanto possibile, il degrado morfologico della laguna

**- Movimentazione dei sedimenti lagunari:** le attività di movimentazione dei sedimenti in laguna devono prevedere, per quanto possibile, il loro mantenimento all'interno del bacino lagunare in modo tale da contrastare il deficit sedimentario. Possono essere previste attività di movimentazione del sedimento per il mantenimento, la preservazione o il ripristino delle morfologie naturali esistenti, per il mantenimento o il ripristino delle vie d'acqua navigabili o per consentire l'utilizzo delle strutture antropiche tradizionali (valli da pesca, cavane dei casoni ecc.), escluse le darsene. Contestualmente possono essere previste movimentazioni di sedimenti per la creazione di strutture morfologiche finalizzate all'espansione degli habitat e alla preservazione morfologico – idraulica della laguna.

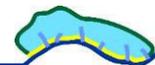
**-Utilizzo del sedimento ricavato dal dragaggio dei canali lagunari:** per quanto possibile, in base all'attuale normativa (185 comma 3, art 50 PTA), il sedimento ricavato da dragaggio deve essere riutilizzato in laguna nell'ambito di strutture morfologiche soggette a marea e che quindi siano parte della naturale mobilità dei sedimenti all'interno della laguna. Possono essere previste sia il ripristino di attuali morfologie (barene e velme), sia la ricostruzione ex novo di tali morfologie. Per maggior dettaglio e indicazioni strategiche e tecniche si veda ai paragrafi dedicati. In via subordinata, a seconda della qualità del sedimento, si potranno prevedere altri riutilizzi quali ad esempio il riuso per il rinforzo o la costruzione di strutture che per loro natura non sono interessate dai processi morfodinamici naturali presenti in laguna (argini di conterminazione o delle valli, altri rilevati).

**-Utilizzo del sedimento ricavato dal dragaggio dei canali alle bocche lagunari:** le aree di bocca lagunare rappresentano la connessione tra la laguna e il mare e in quanto tali sono sede di scambio di acqua e sedimento. I sedimenti ricavati dal loro dragaggio (prevalentemente sabbie) potranno venire utilizzati per il ripascimento delle spiagge adiacenti, una volta verificata la loro qualità in termini di legge e la compatibilità granulometrica con le aree di destinazione, ma anche per la ricostruzione di morfologie in aree di bocca interna (delta tidali di flusso).

**-Ripascimento delle spiagge:** va previsto esclusivamente con l'utilizzo dei sedimenti ricavati in corrispondenza delle bocche lagunari.

**- “Principio di prossimità”:** si basa sull'idea di rendere minima la distanza tra l'area di dragaggio e quella di riutilizzo dei sedimenti. Esso trae spunto dalla pratica tradizionale di collocare i sedimenti dragati dai canali lungo i bordi degli stessi. Inoltre tale soluzione va nella direzione di mimare i processi naturali e di favorire al massimo la sostenibilità degli interventi (CO<sub>2</sub> footprint).

**-Compatibilità fisico / granulometrica:** in linea di principio (PTA) meglio utilizzare sedimenti fini nelle aree interne e sabbie nelle aree adiacenti alle bocche.



## 7. Sintesi delle criticità e proposte di intervento (a cura di UniTS e UniUD)

Nel presente capitolo si intende richiamare brevemente i criteri che hanno portato alla redazione della Tavola 5 “Carta delle aree critiche”, con la selezione di alcune aree lagunari che presentano specifiche problematiche dal punto di vista geomorfologico e morfodinamico e delle relative schede con le proposte di intervento, allegate all’elaborato grafico.

Queste schede vanno considerate come una sintesi del contributo finale allo studio sviluppato da UniTS e UniUD e, come previsto dal piano di lavoro, sono state condivise e discusse all’interno del gruppo di lavoro designato dalla Regione FVG.

In particolare, esse sono state ulteriormente riviste e completate alla luce delle osservazioni e delle proposte raccolte dal tavolo di coordinamento dei rappresentanti della pesca della Regione Friuli Venezia Giulia, riunitisi nelle due date del 12 e del 18 maggio 2017.

Tali osservazioni, opportunamente sintetizzate, sono state ridiscusse e recepite da UniTS e UniUD nella riunione del 26 maggio 2017 e tradotte nelle dovute modifiche.

Il capitolo si conclude con l’applicazione del modello morfodinamico, messo a punto da UniUD, su una serie concordata di interventi, al fine di stimarne l’erosibilità e la durata.

### 7.1. Individuazione delle aree critiche e proposte di intervento

Lo studio di assetto morfologico ambientale della Laguna di Marano e Grado prevede, fra i suoi obiettivi principali, il riconoscimento di aree lagunari che si possano ritenere critiche in termini di processi erosivi, a valle delle analisi realizzate da UniTS e da UniUD, congiunte e complementari dal punto di vista rispettivamente geomorfologico e idrodinamico.

Per l’individuazione di tali criticità si è partiti, dunque, dall’analisi evolutiva della laguna su base cartografica, realizzata da UniTS, che, come riportato nel capitolo 4, ha consentito di identificare le aree stabili nel tempo e quelle soggette a erosione o accumulo; i risultati delle simulazioni idrodinamiche effettuate da UniUD e descritte nel capitolo 3, hanno permesso di riconoscere una maggiore o minore vulnerabilità alla mobilitazione del sedimento dal fondo per effetto dell’interazione tra le correnti di marea e il moto ondoso e al suo successivo trasporto.

In ottemperanza a quanto previsto, è stata sviluppata, quale elaborato cartografico di sintesi, una *Carta delle criticità* della laguna (Tav. 5), di cui si riporta un’immagine rappresentativa in Figura 7.1.

Tale Carta contiene:

1. la carta delle differenze altimetriche che sintetizza, a scala di intera laguna, l’evoluzione dei fondali lagunari tra il 1964 e il 2009 e ne fornisce una stima quantitativa basata su un raffronto topo –cartografico.
2. una cartografia della variazione delle superfici a barena ricavata dallo studio Arpa UniTS che classifica la variazione delle superfici a barena dal 1990 al 2006 espressa in percentuale.

In base ai risultati ottenuti, la laguna presenta problematiche ad ampio raggio e viste le condizioni attuali può essere considerata come sede di una criticità diffusa.

Tali problematiche consistono in generale in:

- un eccessivo approfondimento dei fondali;
- erosione delle velme e barene;
- un indebolimento delle arginature.

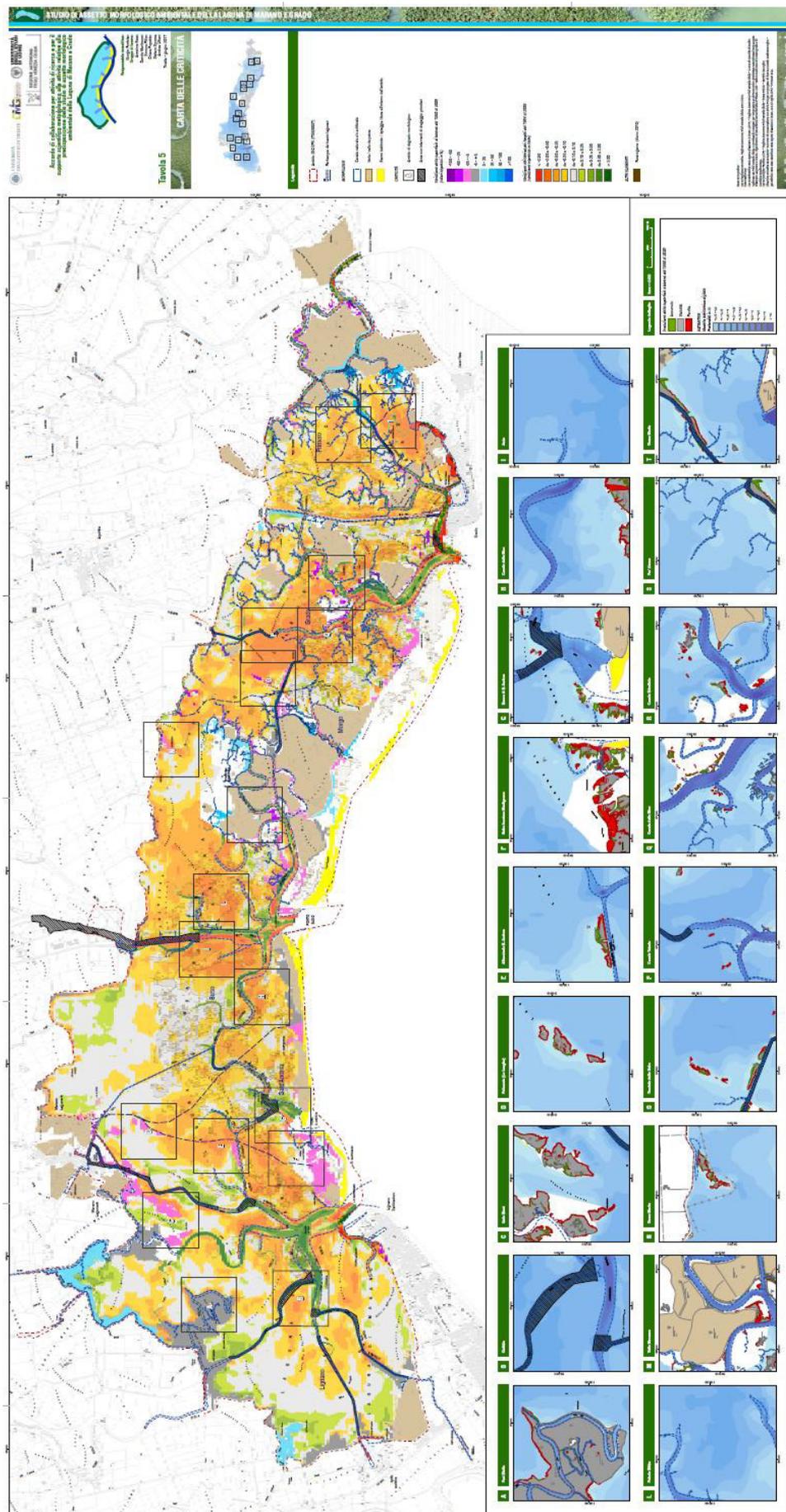
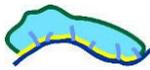
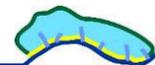


Figura 7.1. Immagine della Carta delle criticità, restituita nella Tavola 5.



In base a questa classificazione e con l'ottica di definire una scala di priorità e di indirizzo generale, si è giunti alla selezione di 18 aree, all'interno della laguna, i cui confini non devono essere però considerati vincolanti ma solo propositivi e non escludono l'estensione della criticità ad aree adiacenti.

Le aree sono delimitate dai riquadri nella *Carta delle criticità* come si può riscontare in Figura 7.1; esse sono inoltre identificate da una lettera e una denominazione e per ciascuna viene riportata un'immagine di dettaglio con in evidenza la tendenza evolutiva delle superfici a barena dal 1990 al 2006, indicando la stabilità in grigio, l'erosione in rosso e il deposito in verde.

Si vuole precisare inoltre che l'individuazione di queste aree tiene conto non solo degli aspetti geomorfologici e idrodinamici, con particolare attenzione all'approfondimento dei fondali e all'erosione delle barene, ma anche dei risultati dei monitoraggi dell'avifauna e delle osservazioni e indicazioni forniti dal dott. Sponza dell'Università di Trieste e da ultimo delle analisi degli elementi di rilevanza individuati dalla cartografia di Piano precedentemente sviluppata.

Alla localizzazione delle aree è seguita un'indagine sulle tipologie dei possibili interventi attuabili per far fronte alle criticità messe in evidenza.

Si precisa che i criteri per la definizione degli interventi e la tipologia e la filosofia di gestione, che sono alla base di quanto proposto, provengono dalla letteratura tecnico scientifica nazionale e internazionale, sviluppata a riguardo e attingono a esperienze e sperimentazioni differenti, oltreché all'esperienza veneziana, più vicina e più simile alla nostra, alla quale è necessario guardare con atteggiamento critico. I principi base adottati per sviluppare le ipotesi di intervento sono riportati nel capitolo 6 del presente Studio.

Gli interventi proposti possono essere considerati come una serie di priorità scelte sulla base di un degrado morfologico particolarmente evidente, dove si propone di intervenire con ripristini o costruzioni ex novo di velme e barene, compatibili con le esigenze legate alle attività di pesca in laguna.

Essi hanno come scopo principale il ripristino funzionale di elementi morfologici e di habitat, tenendo conto anche delle necessità legate agli usi tradizionali dell'ambiente lagunare e a quelle legate alla nidificazione e all'alimentazione dell'avifauna, di primaria importanza, visto il ruolo del sito nell'ambito della Direttiva Europea Natura 2000.

Si specifica che le aree individuate sono anche "candidate ideali" per il riporto di materiali derivanti dal dragaggio ordinario o straordinario dei canali navigabili.

Proprio in relazione a quest'ultimo aspetto, all'inizio dell'elaborato, viene riportata per completezza una cartografia di sintesi con le aree di dragaggio prioritario fornite dalla Regione Autonoma FVG, la perimetrazione dei Corpi Idrici individuati da ARPA FVG e una mappa sedimentologica della laguna ottenuta grazie a una tesi (dott. Alex Paganin) realizzata da UniTS.

All'elaborato grafico segue dunque una serie di schede, composte da due pagine per ciascun sito.

La prima pagina, a cura di UniTS e di cui si riporta un esempio in Figura 7.2, contiene:

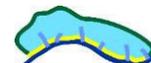
1. la carta geomorfologica, ossia un estratto per l'area di interesse della *Carta degli elementi morfologici della laguna* realizzata appositamente in questo Studio (Tav. 2) con lo scopo di integrare il materiale conoscitivo di base per la stesura del Piano di gestione della laguna;
2. un estratto della Carta delle criticità (Tav. 5);
3. le proposte di intervento con disegno planimetrico delle stesse.

Completa la scheda un breve testo che descrive:

- valenze presenti nell'area;
- le criticità che motivano la scelta dell'area;
- l'intervento ipotizzabile;
- indicazioni operative.

Laddove siano disponibili i dati batimetrici completi, viene inoltre riportata una sezione topografica del fondale con la situazione nei due anni di riferimento (1964-2009) e uno schema, puramente indicativo, dell'ipotesi di intervento.





Nella seconda pagina, a cura di UniUD, già anticipata in Figura 3.45, vengono presentati alcuni risultati di dettaglio ottenuti con il modello idrodinamico della laguna realizzato nell'ambito di questo studio e riportanti:

- massimo stress al fondo in concomitanza con vento di Levante;
- massimo stress al fondo in concomitanza con vento di Scirocco;
- velocità massime della corrente in concomitanza con vento di Levante;
- velocità massime della corrente in concomitanza con vento di Scirocco.

Per ulteriori dettagli e approfondimenti si rimanda al documento "Schede delle proposte di intervento" allegato al presente elaborato.

## 7.2. Verifica modellistica di una serie concordata di interventi

L'ultima fase dell'analisi morfodinamica della laguna di Marano e Grado è stata impostata con la scelta precisa di alcune aree, tra quelle ritenute potenzialmente adatte a ricevere il materiale di dragaggio e la successiva modellazione dei relativi riporti.

Questo studio è partito da un'esigenza contingente espressa dalla Direzione centrale infrastrutture e territorio della Regione FVG, relativamente al conferimento di materiali che verranno dragati nel corso del 2017 lungo diversi canali della laguna di Marano e Grado.

In particolare ci si è concentrati su tre tratti critici, ipotizzando per ciascuno di essi l'area di conferimento più opportuna, selezionata nell'ambito delle zone critiche precedentemente analizzate, sia dal punto di vista morfo-evolutivo che idrodinamico e riassunte nella carta delle aree critiche.

I tratti critici e l'associazione con le zone destinate al conferimento del materiale sono indicati in Figura 7.3, mentre i dati relativi ai volumi da dragare in Tabella 7.1.

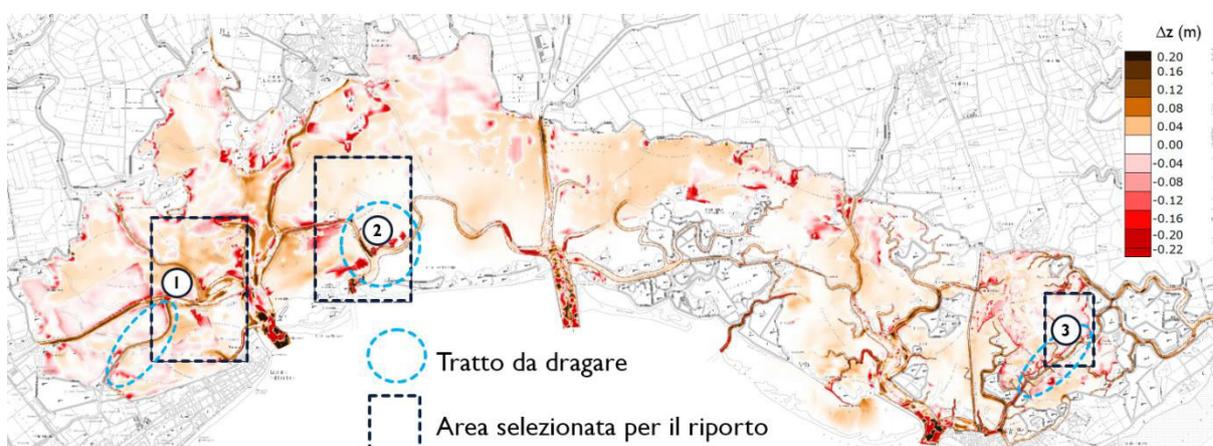
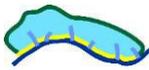


Figura 7.3. Tratti critici che necessitano di un intervento di dragaggio nel corso del 2017 e relativa zona di riporto.

Tabella 7.1. Volumi di dragaggio e relativa zona di riporto scelta tra le aree critiche sopra definite, di cui si riporta in parentesi la lettera identificativa.

Canali	Volumi dragaggi 2017 (m <sup>3</sup> )	Zona di riporto
1 Pantani	65000	(B) Cialisia
2 Confluenza canali S. Pietro e Dei Gorgi	22000	(G) Bocca Sant'Andrea
3 Barbana	5000	(S) Fra' Simon



Sulla base dell'entità dei volumi e delle proposte di possibili interventi, sono state stabilite le disposizioni planimetriche dei tre riporti, sintetizzate nelle Figure 7.4 – 7.6.

Nella prima area si intende distribuire il materiale in maniera da formare una velma con profondità media pari a -0.55 m rispetto al livello medio del mare.

Seguendo un approccio sperimentale, nella seconda area, alla confluenza dei canali Dei Gorghi e S. Pietro, si intende realizzare invece un riporto con spessore costante da stendere sopra le piante di fanerogame diffuse nella zona; questa metodologia avrebbe l'obiettivo di valutare nel tempo il comportamento delle piante e verificare la possibilità che esse sopravvivano allo sversamento del materiale coesivo, ripristinando l'effetto di stabilizzazione e protezione del fondo che esse sono in grado di garantire.

La terza area vedrebbe invece la realizzazione di una nuova barena, con quota emersa rispetto al livello medio del mare e sarebbe candidata ad accogliere i volumi dragati, con manutenzione ordinaria a cadenza annuale, del canale di Barbana.

Per poter stabilire l'evoluzione morfologica degli interventi così ipotizzati e l'eventuale perdita di materiale a seguito dei processi erosivi, sono state effettuate due serie di simulazioni con il modello accoppiato morfodinamico – spettrale messo a punto:

- la prima serie consiste nella simulazione del comportamento a un anno dei riporti in assenza di protezioni temporanee degli stessi;
- la seconda valuta il comportamento dei riporti a due anni ipotizzando, per la prima e la seconda area, una protezione temporanea della durata di un anno, tale da permettere al materiale di consolidarsi parzialmente e alle piante di fanerogame di ricrescere; per la terza area invece non sono previste protezioni e dunque si valuta la configurazione a due anni, in assenza delle stesse.

Le simulazioni di dettaglio hanno richiesto un raffittimento della *mesh* idrodinamica in corrispondenza delle tre aree, portando a circa 183000 il numero degli elementi e riducendo la dimensione minima delle celle; queste condizioni hanno comportato un significativo incremento dei tempi computazionali.

La *mesh* così ridefinita è stata quindi riquotata sulla base delle indicazioni volumetriche dei riporti.

Nella prima serie di simulazioni, si è tenuto conto del fatto che il materiale coesivo, nel periodo immediatamente successivo alle operazioni di riporto, è scarsamente consolidato e per questo più esposto ai processi erosivi. Per tale motivo in corrispondenza degli interventi è stata assegnata una tensione critica di erosione pari a 0.5 Pa, rappresentativa proprio della categoria di fondali soggetti a maggiore mobilità.

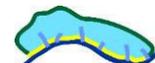
Nella seconda serie di simulazioni, è stato previsto un parziale consolidamento del materiale nella prima e nella terza area, per cui il valore di tensione critica è stato aumentato a 0.7 Pa, tipico dei fondali sommersi e dei canali lagunari; alla confluenza dei canali Dei Gorghi e S. Pietro invece, supponendo che le fanerogame siano nuovamente in grado di agire da stabilizzatori del fondale, la tensione critica di erosione è maggiore e pari a 1.3 Pa, valore corrispondente alla classe relativa ai fondali coperti totalmente o parzialmente da vegetazione sommersa.

Si riportano i risultati comparativi nelle Figure 7.7 – 7.9 per la prima serie e 7.10 – 7.12 per la seconda serie.

Le simulazioni evidenziano che in assenza di protezioni temporanee, al termine del primo anno si registra una perdita di volume nell'area alla confluenza tra i canali Cialisia e Coron pari circa all'85%, quasi totale nella seconda area e infine pari al 30% nella zona prossima al canale di Barbana.

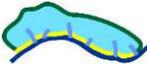
Durante il secondo anno, successivo alla protezione temporanea e in forza del parziale consolidamento, si perderebbe circa il 65% del volume nel primo intervento e un 29% nel secondo.

Si aggiungerebbe invece un ulteriore 8% alla perdita di volume del primo anno, nella barena non protetta di Fra' Simon, per un totale complessivo alla fine dei due anni del 38%.

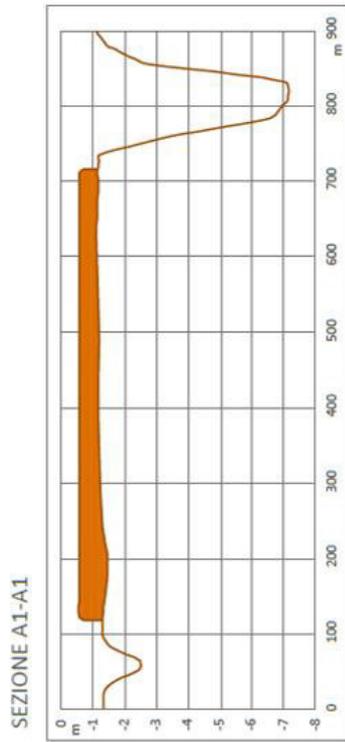


A completamento dell'analisi sono state redatte due tavole, in allegato alla presente relazione, rispettivamente indicate come:

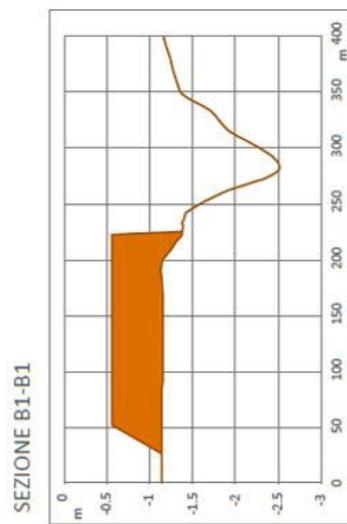
- Tavola 6, rappresentativa dell'evoluzione morfologica del fondo sull'intero territorio lagunare a un anno in assenza di protezioni temporanee dei riporti;
- Tavola 7, rappresentativa della variazione del fondo dopo due anni con parziale consolidamento dei riporti.



## Area I: Confluenza canali Cialisia e Coron

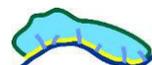


Dragaggi canale  
Pantani  
Volume previsto:  
circa **65000 m<sup>3</sup>**

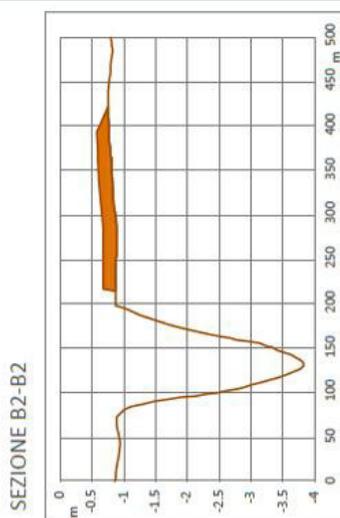
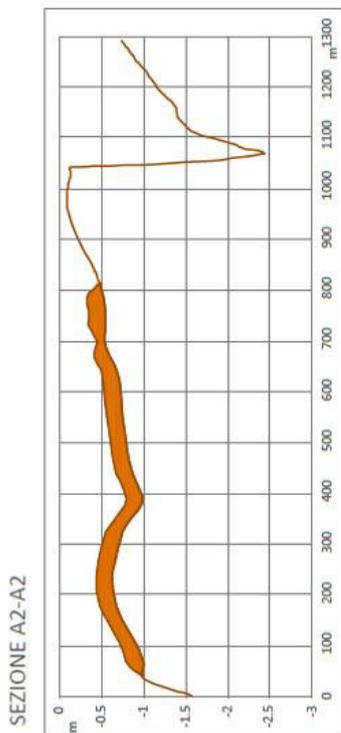
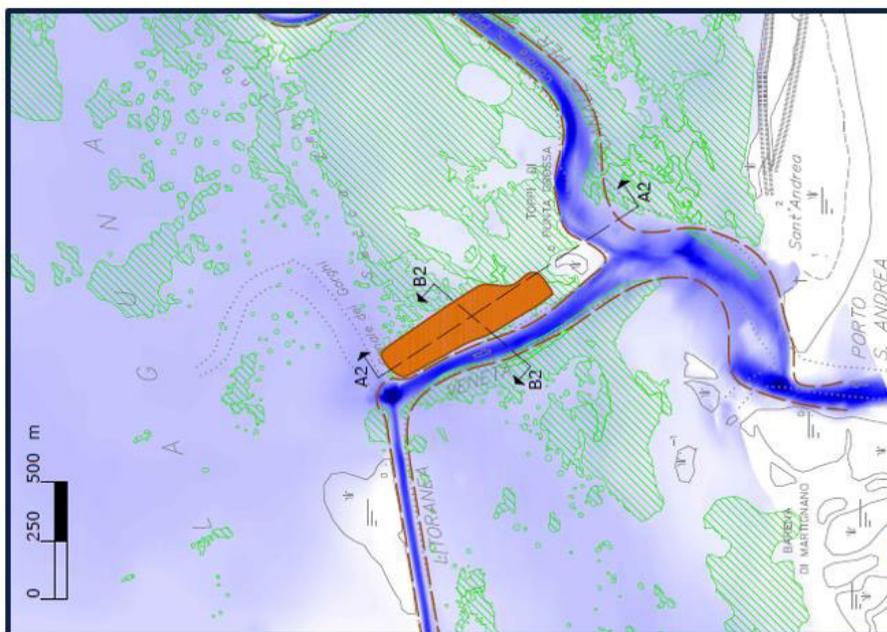


SEZIONI INIZIALI

Figura 7.4 Disposizione planimetrica e sezioni del riporto conferito nella prima area. Il tratteggio verde indica la presenza di fanerogame.



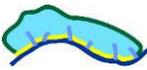
Area 2: Confluenza canali Dei Gorghi e S. Pietro



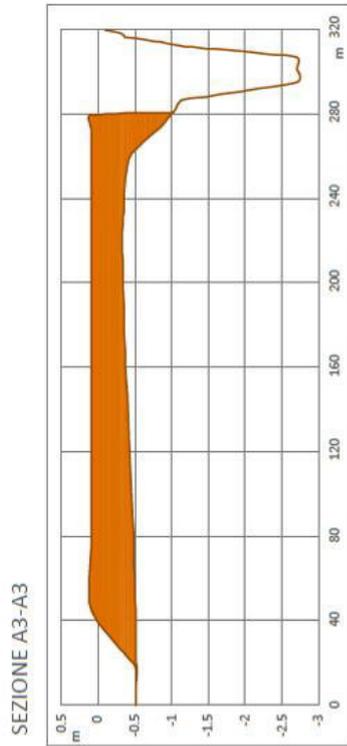
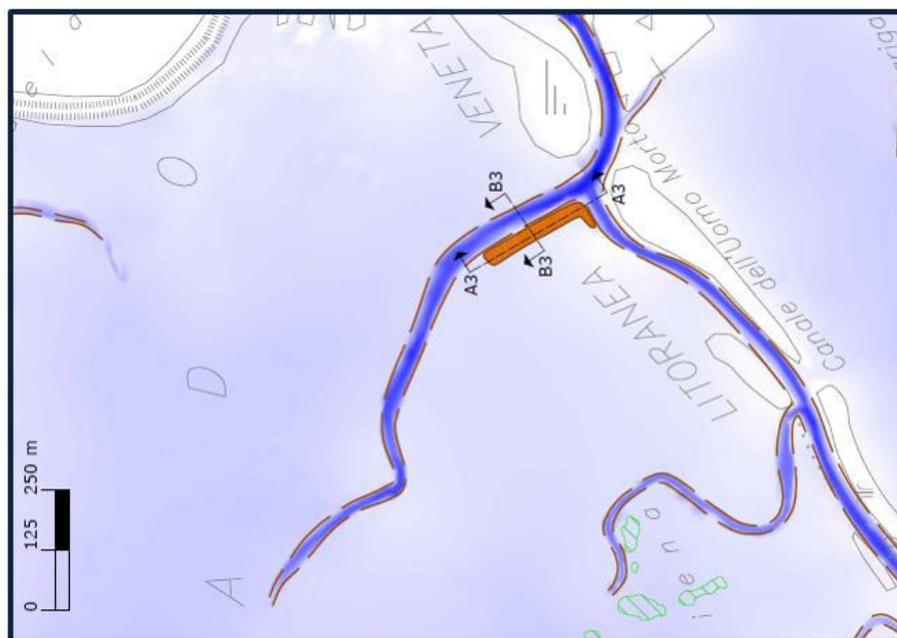
SEZIONI INIZIALI

Dragaggi confluenza  
canali S. Pietro e  
Dei Gorghi  
Volume previsto:  
circa **22000 m<sup>3</sup>**

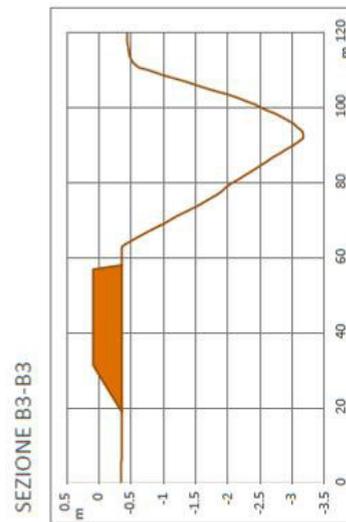
Figura 7.5. Disposizione planimetrica e sezioni del riporto conferito nella seconda area. Il tratteggio verde indica la presenza di fanerogame.



### Area 3: Fra' Simon

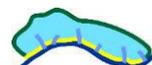


Dragaggi canale  
Barbana  
Volume previsto:  
circa **5000 m<sup>3</sup>**



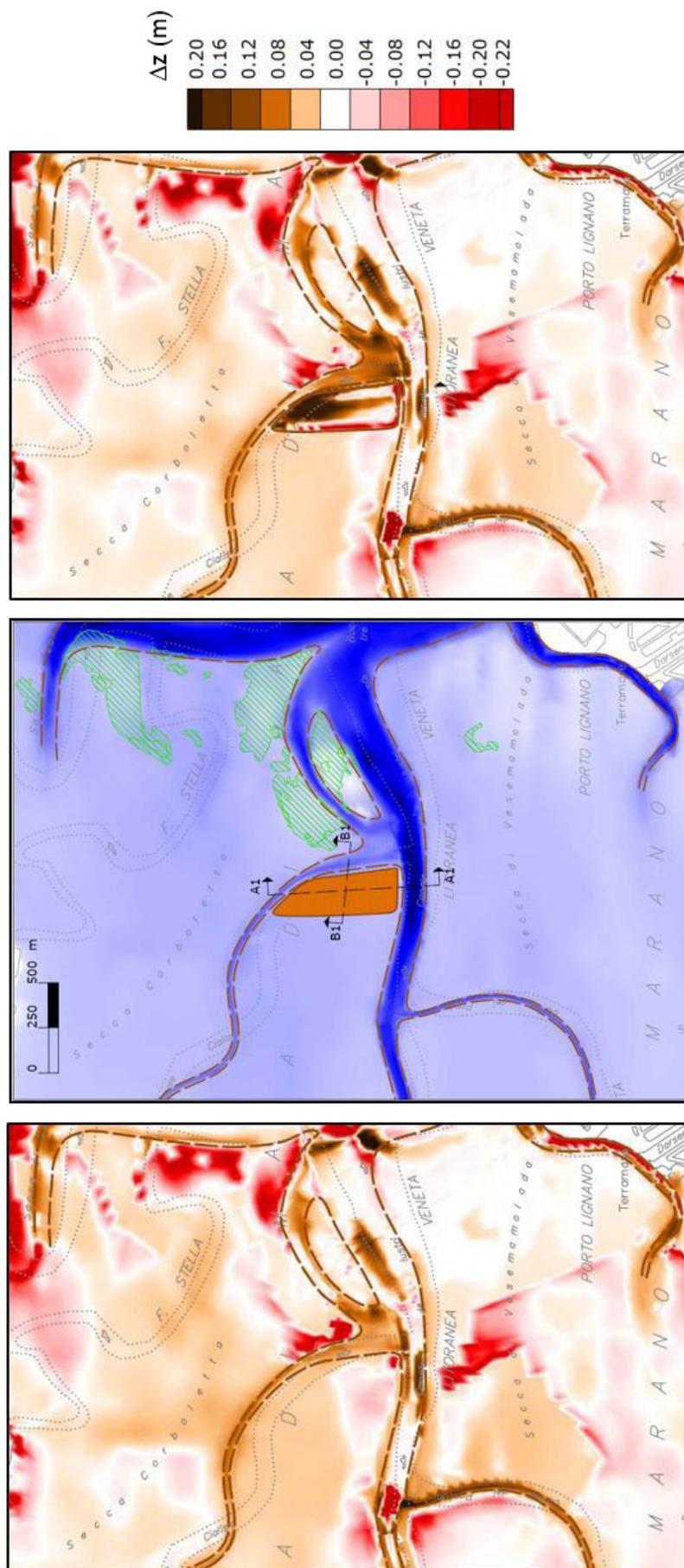
SEZIONI INIZIALI

Figura 7.6. Disposizione planimetrica e sezioni del riporto conferito nella terza area. Il tratteggio verde indica la presenza di fanerogame.



Simulazione di un anno senza protezione temporanea

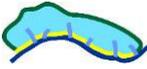
**Area I: Confluenza canali Cialisia e Coron**



Senza intervento

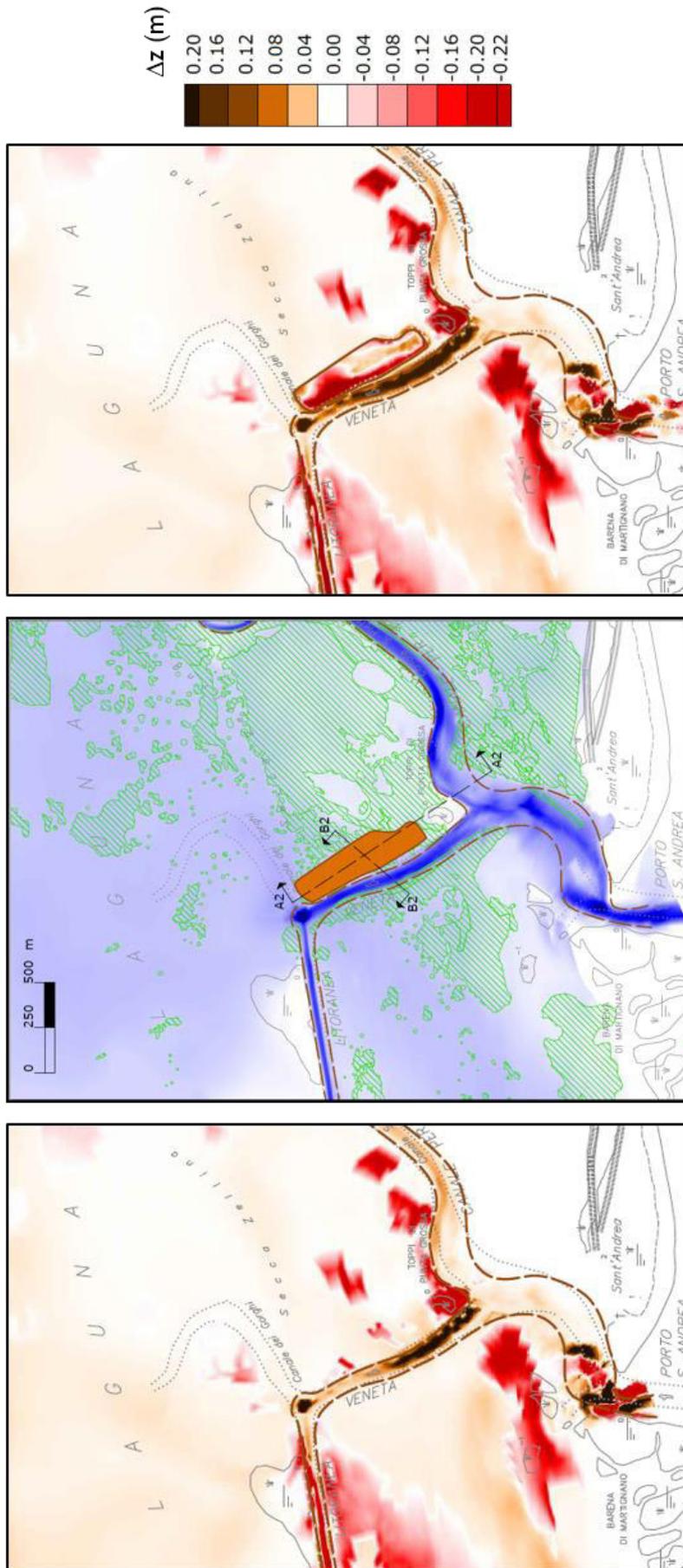
Con intervento non protetto

Figura 7.7. Evoluzione del fondo nella prima area dopo un anno: in assenza di intervento nel riquadro a sinistra; in presenza di intervento non protetto nel riquadro a destra; al centro disposizione planimetrica del riporto.



Simulazione di un anno senza protezione temporanea

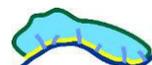
**Area 2: Confluenza canali Dei Gorgi e S. Pietro**



Senza intervento

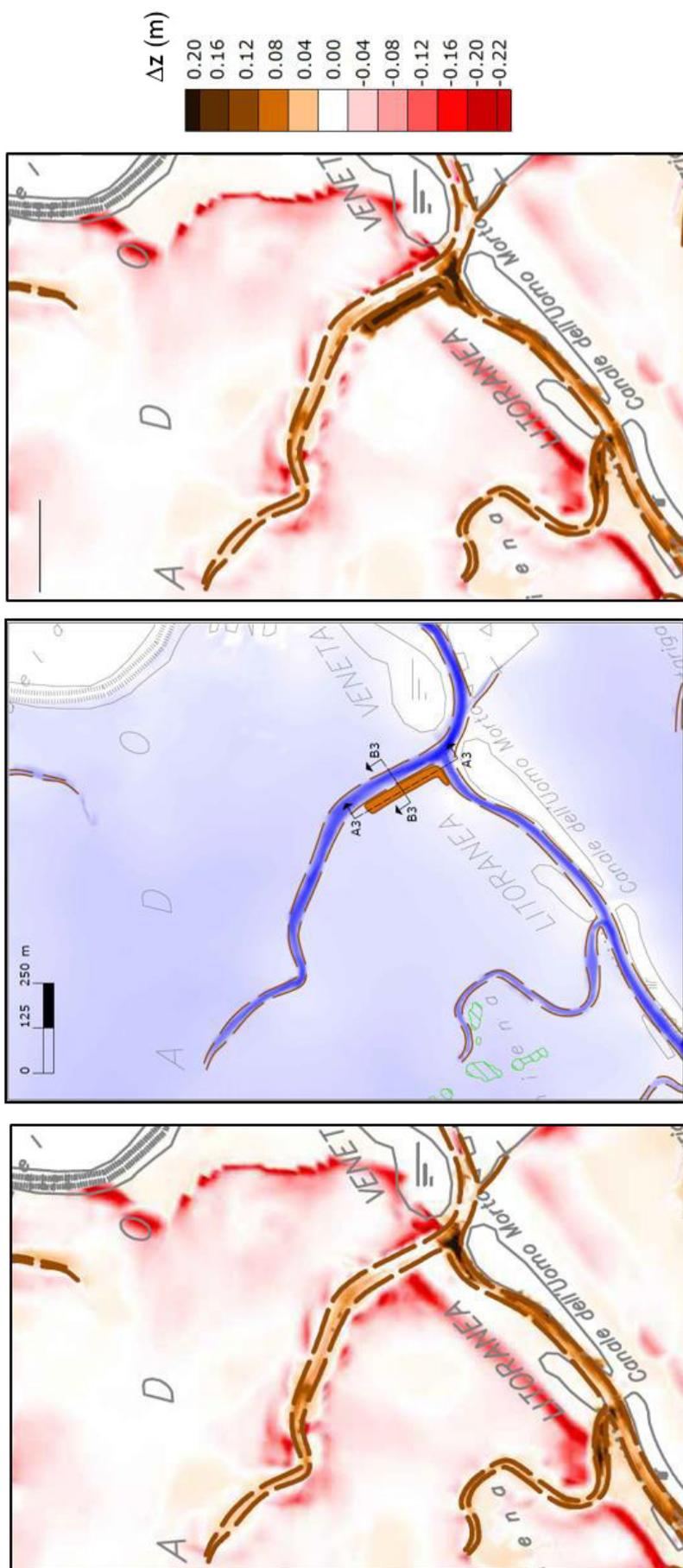
Con intervento non protetto

Figura 7.8. Evoluzione del fondo nella seconda area dopo un anno: in assenza di intervento nel riquadro a sinistra; in presenza di intervento non protetto nel riquadro a destra; al centro disposizione planimetrica del riporto.



Simulazione di un anno senza protezione temporanea

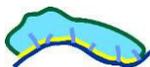
**Area 3: Fra' Simon**



Senza intervento

Con intervento non protetto

Figura 7.9. Evoluzione del fondo nella terza area dopo un anno: in assenza di intervento nel riquadro a sinistra; in presenza di intervento non protetto nel riquadro a destra; al centro disposizione planimetrica del riporto.



## Simulazione dopo due anni con parziale consolidamento

### Area I: Confluenza canali Cialisia e Coron

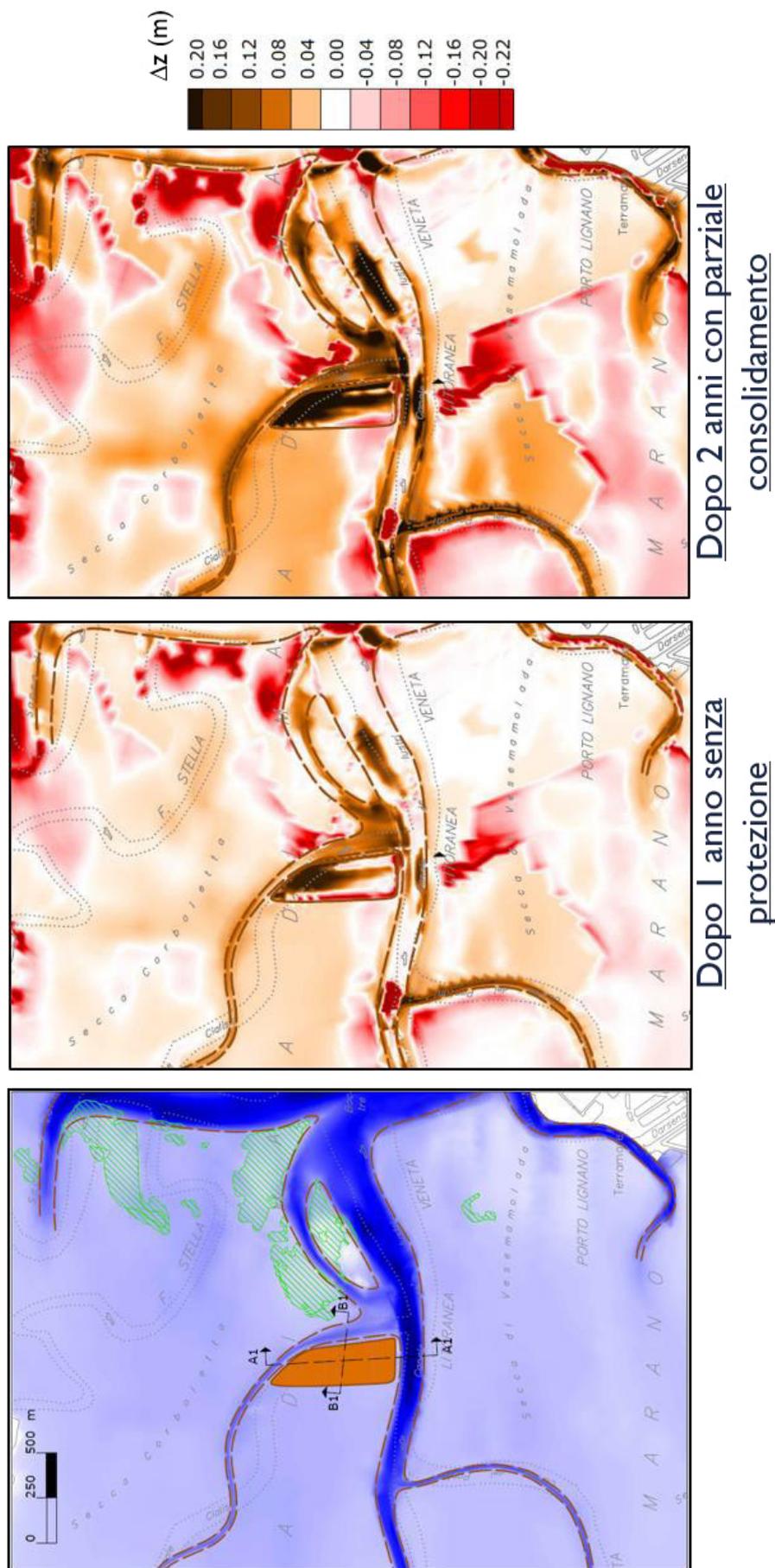
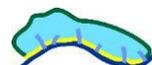


Figura 7.10. Evoluzione del fondo nella prima area: dopo un anno con intervento non protetto nel riquadro al centro; dopo due anni e con parziale consolidamento del riquadro a destra; nel riquadro a sinistra disposizione planimetrica del riporto.



Simulazione dopo due anni con parziale consolidamento

**Area 2: Confluenza canali Dei Gorgi e S. Pietro**

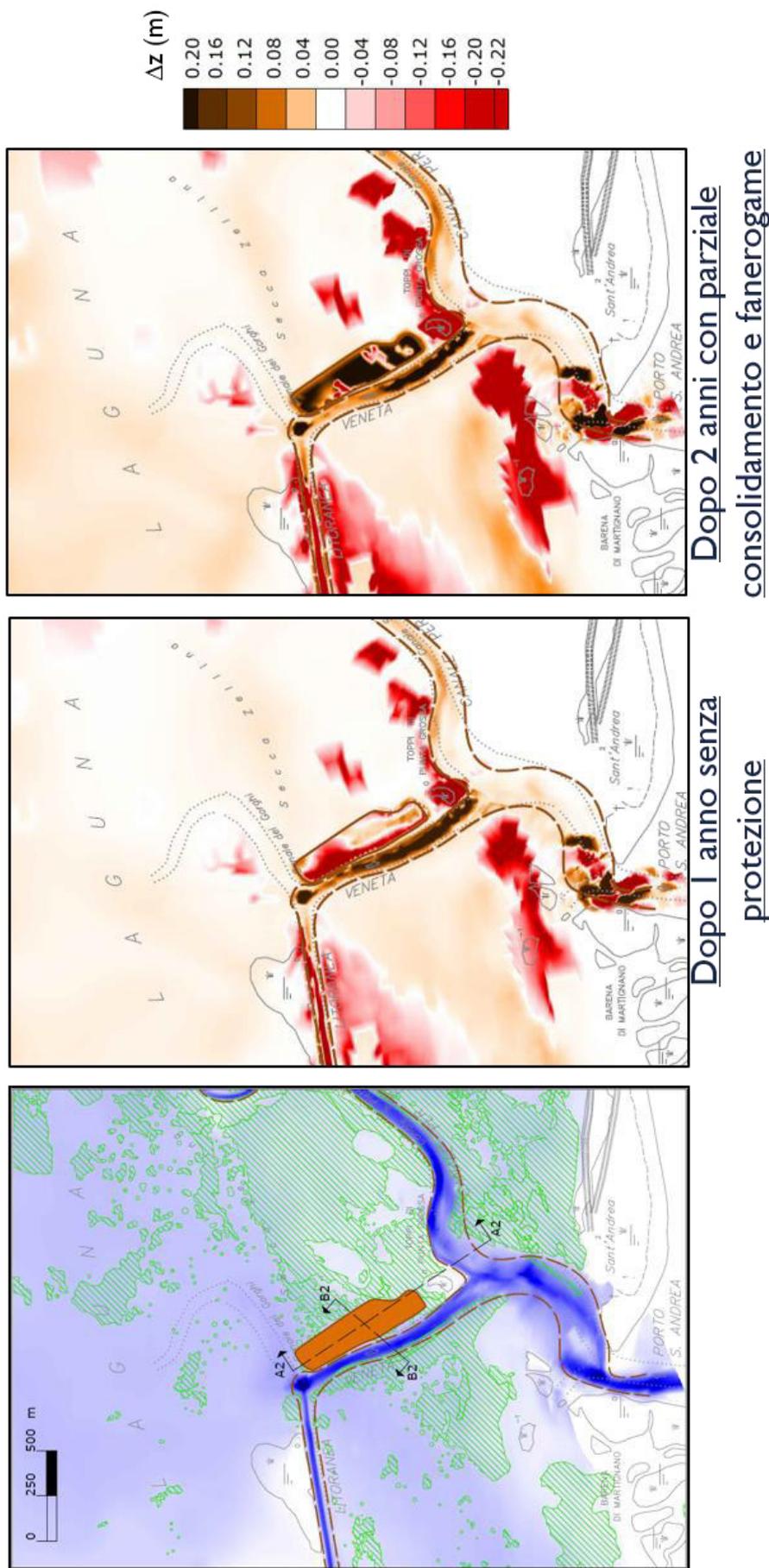
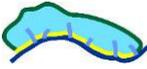


Figura 7.11. Evoluzione del fondo nella seconda area: dopo un anno con intervento non protetto nel riquadro al centro; dopo due anni e con parziale consolidamento del riparto a destra; nel riquadro a sinistra disposizione planimetrica del riparto.



## Simulazione dopo due anni con parziale consolidamento

### Area 3: Fra' Simon

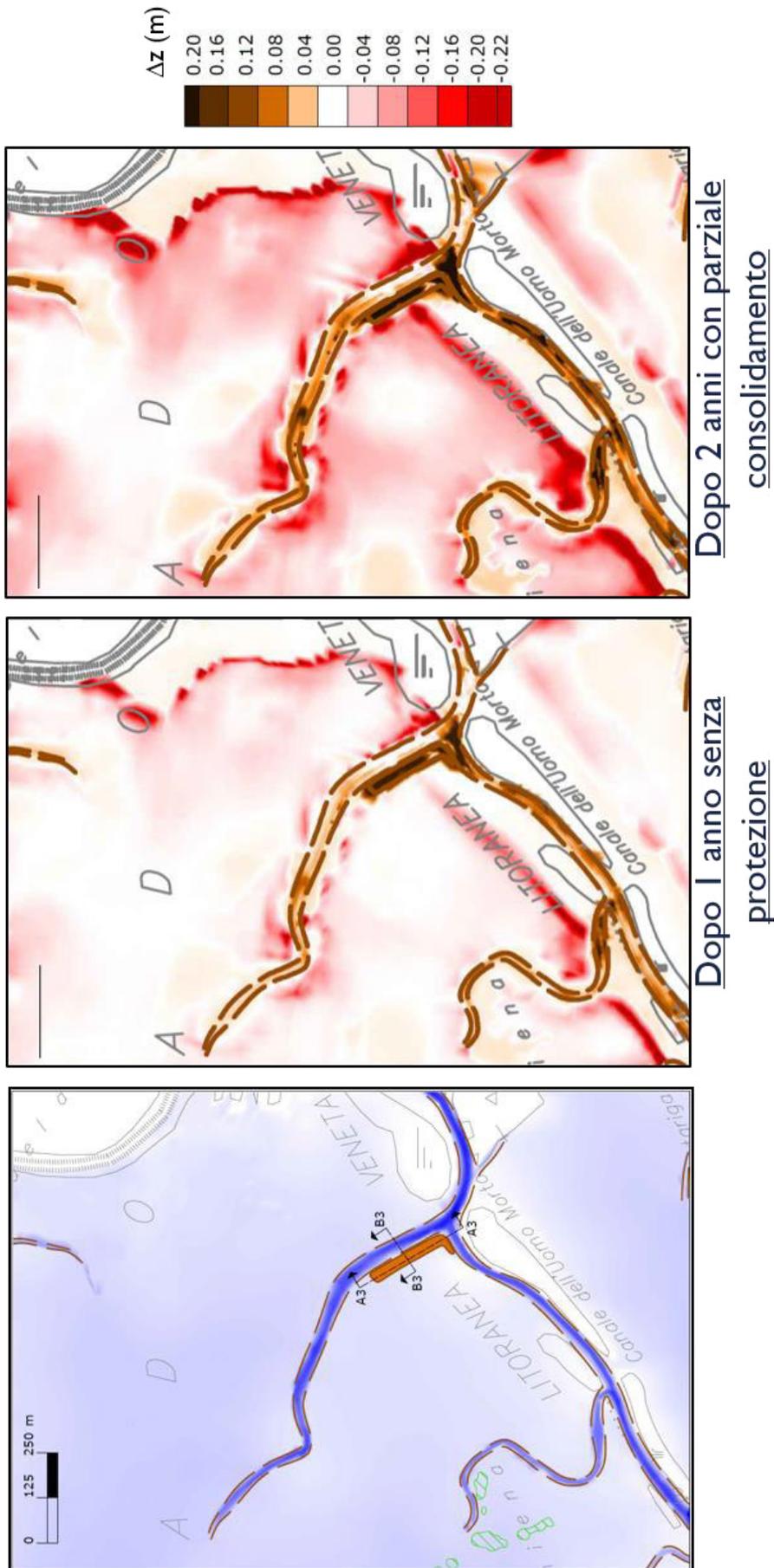
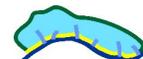


Figura 7.12. Evoluzione del fondo nella terza area: dopo un anno con intervento non protetto nel riquadro al centro; dopo due anni e con parziale consolidamento del riquadro a destra; nel riquadro a sinistra disposizione planimetrica del riporto.



## 8. Conclusioni (a cura di UniTS e UniUD)

Lo *Studio di assetto morfologico ambientale della laguna di Marano e Grado* deve rispondere all'esigenza di definire uno strumento scientifico per una corretta pianificazione e gestione degli interventi in laguna, volti a tutelarne i principali aspetti morfologico-idrodinamici e sedimentologici, nell'ambito di obiettivi condivisi riguardanti la conservazione dell'ambiente, la conservazione della natura e della biodiversità, nonché la tutela delle attività antropiche tradizionali e la sicurezza dei canali navigabili.

Tale strumento deve essere il frutto congiunto di diverse competenze, essendo l'ambiente lagunare per sua natura regolato da equilibri molto complessi e frutto di processi evolutivi di origine diversa. Da qui la necessità di costituire un Gruppo di Lavoro in grado di rispondere alla multidisciplinarietà dello Studio.

Il contributo del gruppo di ricerca dell'Università di Udine (UniUD) si è concentrato sulla comprensione e descrizione dei principali aspetti idrodinamici e morfodinamici della laguna, regolati dalla continua interazione tra le correnti di marea determinate dall'oscillazione periodica della superficie libera del mare e il moto ondoso che si genera all'interno del bacino lagunare per l'effetto radente del vento sulla stessa. Il primo passo fondamentale e imprescindibile per questo Studio era dunque delineare una base di supporto conoscitiva sia della marea che della distribuzione dei venti in laguna. A tal proposito sono stati raccolti e analizzati circa 4.3 milioni di dati mareografici e circa 780000 dati anemometrici. Da questa analisi è stato possibile caratterizzare le forzanti che, dal punto di vista idrodinamico, agiscono in laguna su un arco temporale medio di un anno.

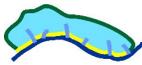
La realizzazione del modello idrodinamico ha richiesto successivamente la discretizzazione del dominio di studio con una *mesh* di calcolo, cui sono state attribuite le quote derivanti da una serie di fonti cartografiche e batimetriche reperite e dei coefficienti di resistenza al fondo, il cui valore è stato determinato nella fase di calibrazione del modello stesso.

Le prime simulazioni idrodinamiche hanno consentito di mappare la distribuzione delle tensioni massime al fondo e i campi di corrente, portando a individuare le aree potenzialmente più esposte al sollevamento del sedimento dal fondo e suo successivo trasporto.

Questi risultati sono stati incrociati con lo studio effettuato dal gruppo di ricerca dell'Università degli Studi di Trieste (UniTS). Quest'ultimo, attraverso una serie di analisi cartografiche e spaziali in G.I.S. completate da rilievi e sopralluoghi sul campo, ha portato alla determinazione dello stato morfologico - evolutivo dell'intera laguna e dei principali elementi morfologici che la compongono.

I risultati delle differenti analisi compiute, sia a livello di intera laguna che di ciascun elemento morfologico, hanno confermato che la laguna sta subendo un processo di marinizzazione e di semplificazione morfologica secondo un modello evolutivo di laguna in deficit sedimentario (Nichols, 1989). Vi concorrono l'innalzamento relativo del livello del mare in atto nell'Alto Adriatico (Lambeck et al., 2004; Antonioli et al., 2009) e gli scarsi apporti solidi fluviali. Ne sono conseguenza tangibile la perdita di superfici a barena, l'approfondimento dei fondali lagunari a ridotto battente d'acqua (le velme comprese tra 0 e - 0.6 m), la scomparsa dei canali secondari e l'interrimento di quelli principali. Questo fenomeno è stato quantificato nelle sue diverse componenti sia a scala di intera laguna che di singolo bacino e localizzato con buon dettaglio in termini spaziali. Nel contempo la tendenza trasgressiva incide solo in parte sul comportamento evolutivo delle isole barriera e dei banchi esterni che delimitano la laguna verso mare.

I risultati delle suddette analisi sono stati utilizzati per la redazione di *Linee di indirizzo per la gestione geomorfologica della laguna* che intendono essere uno strumento a servizio della gestione della laguna e che sono destinate a far parte integrante del redigendo *Piano di Gestione* dello ZSC/ZPS IT3320037 *Laguna di Marano e Grado*. Esse sono completate da una serie di osservazioni e indicazioni finalizzate a indirizzare, quanto più possibile correttamente, gli obiettivi gestionali verso la conservazione e la tutela



delle specie ornitiche. Nel contempo sono state redatte una prima serie di indicazioni per la futura stesura di un Disciplinare per la movimentazione di sedimenti in laguna.

Grazie al confronto dei risultati ottenuti da entrambi i gruppi di ricerca è stato possibile redigere una carta delle criticità che indica una serie di aree con manifesti problemi di carattere geomorfologico e sedimentologico, che possono consistere in:

- eccessivo approfondimento dei fondali ed erosione delle barene;
- indebolimento delle arginature;
- deposito consistente di sedimento, che può quindi ostacolare la navigabilità di canali trafficati.

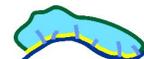
Accanto al riconoscimento delle aree critiche, è stata proposta una serie di interventi che hanno come scopo principale il ripristino funzionale degli elementi morfologici, tenendo conto sia del rispetto dell'ambiente lagunare che delle necessità contingenti legate alle molteplici attività produttive che gravitano attorno alla laguna. Nello stesso tempo le aree individuate sono anche "candidate ideali" per il riporto di materiali derivanti dal dragaggio dei canali.

Proprio a partire da un'esigenza espressa dalla *Direzione centrale infrastrutture e territorio della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia*, relativamente al conferimento di materiali che verranno dragati nel corso del 2017 lungo diversi canali della laguna di Marano e Grado, sono stati ipotizzati tre diversi conferimenti di sedimenti in altrettante collocazioni scelte fra quelle descritte.

Per valutare l'erodibilità degli interventi, concordati congiuntamente nelle modalità e disposizioni planimetriche e volumetriche, è stato applicato il modello morfodinamico della laguna, messo a punto dal gruppo di ricerca dell'Università di Udine nel presente Studio. In particolare il modello è stato calibrato attraverso un confronto con dati sperimentali di tensione critica di erosione rilevati nella laguna di Venezia e verificato in base ai volumi dragati nei principali canali della laguna di Marano e Grado negli ultimi dieci anni.

Il riscontro tra il dato sperimentale e quello numerico è molto buono. Il modello è stato infine applicato per la simulazione dei tre interventi, dando modo di valutarne l'erodibilità in due diverse configurazioni, che prevedono o meno la possibilità di una protezione temporanea degli stessi.

Nell'ottica di una programmazione pluriennale degli interventi, il metodo scientifico che ha portato alla definizione delle aree critiche evidenziate all'interno della laguna e del modello morfodinamico, si dimostra essere uno strumento importante, utile alla corretta gestione e pianificazione dei dragaggi e successivo conferimento dei materiali.



## 9. Ringraziamenti

Si ringrazia quanti hanno collaborato a questo studio fornendo informazioni e dati utili.

Per la Regione Friuli Venezia Giulia:

- Pierpaolo Zanchetta, Antonella Triches, Umberto Fattori, Gabriele Facchin  
*Direzione centrale infrastrutture e territorio*  
Servizio paesaggio e biodiversità
- Alberto Deana, Giacomo Casagrande, Katia Crovatto  
*Direzione centrale ambiente ed energia, Area tutela geologico-idrico-ambientale*  
Servizio disciplina servizio idrico integrato, gestione risorse idriche, tutela acque da inquinamento
- Lorenzo Fogale, Mauro Cosolo  
*Direzione centrale risorse agricole, forestali e ittiche*  
Servizio caccia e risorse ittiche
- Chiara di Marco, Nicola Stefanelli  
*Direzione centrale infrastrutture e territorio, Servizio porti e navigazione interna, posizione organizzativa coordinamento infrastrutture per gli ambiti lagunari, della navigazione interna e portualità minore di competenza regionale*

Per l'Arpa FVG:

- Luca Marchesi, Fulvio Stel  
*Settore Tecnico Scientifico CRMA - Palmanova*
- Enrico Bressan  
*S.O.S. Pareri e supporto per le autorizzazioni ambientali - Palmanova*
- Marcellino Salvador  
*funzione Previsioni Climatologia, Idrologia e Applicazioni Meteorologiche*  
s.o.c. OSMER
- Ida Floriana Aleffi  
*Osservatorio Alto Adriatico*

Per la Protezione Civile FVG:

- Guglielmo Galasso, Servizio Tecnico Scientifico
- Aldo Primiero
- Fulvio Nodari

Per il CNR – ISMAR:

- Fabio Raichic  
Trieste
- Mauro Bastianini  
Venezia

Per ISPRA Venezia:

- Franco Crosato
- Giorgio Leto

Per il Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali e Animali dell'Università di Udine

- Valentino Casolo
- Francesco Boscutti

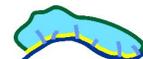


Per il Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste:

- Mauro Bussi
- Giulia Casagrande
- Silvia Borghello

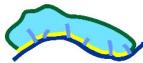
Gli studenti:

- Eleonora Driusso
- Sara Menon
- Alex Paganin



## 10. Bibliografia

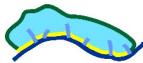
- ADNITT C., BREW D., COTTLE R., HARDWICK M., JOHN S., LEGGETT D., MCNULTY S., MEAKINS N. & STANILAND R., 2007. *Saltmarsh management manual*. Joint Defra / Environment Agency Flood and Coastal Erosion Risk Management, R&D Technical Report SCO30220, 123 pp.
- ALBANI A.D., FAVERO V., SERANDREI BARBERO R., 1983. Apparatii intertidali della laguna di Venezia. In *Laguna, fiumi, lidi: cinque secoli di gestione delle acque nelle Venezia*. Venezia, 10-12 giugno 1983, Grafiche La Press: 221-228 p.
- ALLEN J.R.L., 2000. Morphodynamics of Holocene saltmarshes: A review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Review*, 19: 1151-1231.
- AMOS C. L., BERGAMASCO A., UMGIESSER G., CAPPUCCI S., CLOUTIER D., DENAT L., FLINDT M., BONARDI M., CRISTANTE S., 2004. The stability of tidal flats in Venice Lagoon—the results of in-situ measurements using two benthic, annular flumes. *Journal of Marine Systems*, vol 51, 211-241.
- ANTONIOLI F., FERRANTI L., FONTANA A., AMOROSI A., BONDESAN A., BRAITENBERG C., DUTTON A., FONTOLAN G., FURLANI S., LAMBECK K., MASTRONUZZI G., MONACO C., SPADA G., STOCCHI P., 2009. Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian and Istrian coastlines. *Quaternary International*, 206: 102-133.
- ASHLEY G.M. & ZEFF M.L., 1988. Tidal channel classification for a low-mesotidal salt marsh. In Ashley G.M. (Ed.) *The hydrodynamics and sedimentology of a back-barrier lagoon- salt marsh system, Great Sound, New Jersey*. *Marine geology*, 82: 17-32.
- ATKINSON P.W., CROOKS S., GRANT A., REHFISCH M.M., 2001. *The success of creation and restoration schemes in producing intertidal habitat suitable for waterbirds*. English Nature Research Reports, 425: 166 p.
- AUDUSSE E., BOUCHUT F., BRISTEAU M.-O., KLEIN R., PERTHAME B., 2004. A fast and stable well-balanced scheme with hydrostatic reconstruction for shallow water flows. *SIAM Journal Sci. Comput.*, 25(6), 2050–65.
- BERTOLERO A., ORO D., VILALTA A.M., LÓPEZ M.À., 2005. Selection of foraging habitats by Little Terns (*Sterna albifrons*) at the Ebro Delta (NE Spain). *Revista Catalana D'ornitologia*, 21: 37-42.
- BETTINETTI, A., MATTAROLO, F. & SILVA, P., 1995. Reconstruction of saltmarshes in the Venice Lagoon. In: Özhan E. (Ed.) *Proc. MEDCOAST 94 Conference, 22-27 October 1995 Tarragona, Spain*, 921-935 p.
- BEZZI A., 2013. *Le barene della laguna di Marano e Grado: analisi degli aspetti morfo-evolutivi nella prospettiva gestionale*. Tesi di dottorato inedita, Università degli Studi di Trieste: 134 pp.
- BEZZI A., DRIUSSO E., MARTINUCCI D., FONTOLAN G., 2015. The historical practice of disposal of dredged sediments in the Marano and Grado Lagoon: evaluation of geomorphological, evolutionary and functional perspective of the resulting artificial saltmarshes. *Coastal and Maritime Mediterranean Conference CM<sup>2</sup>, Ferrara 25-27 November 2015*. Editions Paralia online, <http://dx.doi.org/10.5150/cmcm.2015.024>: 115-118.



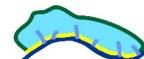
- BOLAM S.G. & WHOMERSLEY P., 2005. Development of macrofaunal communities on dredged material used for mudflat enhancement: a comparison of three beneficial use schemes after one year. *Marine Pollution Bulletin*, 50 (2005): 40–47
- BON M. & SCARTON F., 2009. Vertebrati terrestri. In Minelli A. (Ed.). *Lagune ed estuari*. Quaderni Habitat. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio-Museo Friulano di Storia Naturale di Udine: 113-133.
- BONOMETTO L., 2003. *Analisi e classificazione funzionale delle "barene" e delle tipologie di intervento sulle barene*. Comune di Venezia, 232 pp.
- BONOMETTO L., 2015. *Relazione riutilizzo dei sedimenti*. TCLV-S Venis Cruise 2.0 Nuovo Terminal Crociere di Venezia Bocca di Lido. TCLV G07 DLTB S 0001, 56 pp.
- BOOIJ N., RIS R.C., HOLTHUIJENS L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104, C4, 7649-7666.
- BOORMAN L.A., 1995. Sea level rise and the future of the British coast. *Coastal Zone Topics: Process, Ecology and Management*, 1: 10–13.
- BOSCUTTI F., FRANCESCATO C., CASOLO V., 2012. Carta di distribuzione delle fanerogame sommerse della laguna di Grado e Marano. Università degli studi di Udine, Commissario delegato per l'emergenza socio-economico ambientale determinatasi nella laguna di Marano Lagunare e Grado.
- BRAMBATI A., 1969. Sedimentazione recente nelle Lagune di Marano e di Grado (Adriatico settentrionale). *Studi Trentini di Scienze Naturali*, Sez. A, 46 (1): 142-239.
- BRAMBATI A., 1987. *Studio sedimentologico e marittimo costiero dei litorali del Friuli Venezia Giulia, ipotesi di intervento per il recupero ambientale e la valorizzazione della fascia costiera*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione Regionale dei lavori Pubblici, Servizio dell'Idraulica, Trieste: 67 pp.
- BRAMBATI A., 1988. Lagune e stagni costieri: due ambienti a confronto. In: *Le lagune costiere: ricerca e gestione* (Carrada G.C., Cicogna F, Fresi E. Eds), CLEM: 9-33 p.
- BRAMBATI A., 1996. *Metalli pesanti nelle lagune di Marano e Grado: piano di studi finalizzato all'accertamento della presenza di eventuali sostanze tossiche persistenti nel bacino lagunare di Marano e Grado ed al suo risanamento*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione Regionale dell'Ambiente, Servizio dell'Idraulica, Trieste: 175 pp.
- BRAMBATI A., DE MURO S., MAROCCO R., SELIVANOV A., 1998. Barrier island evolution in relation to sea-level changes: the example of the Grado Lagoon (northern Adriatic Sea, Italy). *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 39 (2): 145-161.
- BURLA I., 2003. *Metodologie di valutazione del rischio costiero associato a diverse valenze ambientali*. Tesi di Dottorato inedita, Università degli Studi di Trieste: 201 pp.
- CAMPOMORI C., 2008. *Analisi dei movimenti spazio-temporali di uccelli acquatici svernanti nelle zone umide dell'alto Adriatico*. XXI ciclo del Dottorato di Ricerca in Metodologie di biomonitoraggio dell'alterazione ambientale.
- CARNIELLO L., DEFINA A., D'ALPAOS L., 2009. Morphological evolution of the Venice lagoon: evidence from past and trend for the future. *Journal of Geophysical Research*, 114: F04002.
- CECCONI G., CODATO F., NASCIMBENI P., MATTAROLO F., 1998. Valore ambientale delle barene artificiali. *Quaderni Trimestrali del Consorzio Venezia Nuova*, 1.



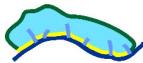
- COLENTT A., 2001. *Saltmarsh management techniques, a review*. New Forest District Council, Coast Protection Group: 29 pp.
- COSOLO M., SPONZA S. & FATTORI U., 2015. *La laguna di Marano e Grado: un mosaico di biodiversità – un patrimonio da preservare*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Udine, 52 pp.
- COVELLI S., FONTOLAN G., BEZZI A., EMILI A., MARTINUCCI D., PELLEGRINI E., PILLON S., POPESSO C., 2013. *Accordo di collaborazione con ARPA FVG per un progetto di ricerca e studio sedimentologico- geochimico delle aree barenicole della laguna di Marano e Grado d.d. 20 aprile 2012*. Relazione Finale. Rapporto Tecnico Rt 3, Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Matematica e Geoscienze, 149 pp.
- DEFINA A., CARNIELLO A., FAGHERAZZI S., D'ALPAOS L., 2007. Self-organization of shallow basins in tidal and salt marshes. *Journal of Geophysical Research*, 112: F03001.
- DIAS M.P., GRANADEIRO J.P., LECOQ M., SANTOS D.C., PALMEIRIM J.M., 2006. Distance to high-tide roosts constrains the use of foraging areas by dunlins: Implications for the management of estuarine wetlands. *Biological Conservation*, 131(3): 446-452.
- DOODY J.P., 2008. *Saltmarsh Conservation, Management and Restoration*. Springer: 217 pp.
- DORIGO L., 1965. *La laguna di Grado e le sue foci. Ricerche e rilievi idrografici*. Magistrato delle Acque. Ufficio Idrografico, Venezia, Pubbl. n. 155: 231 pp.
- DORIGO L., 1966. *La carta idrografica della Laguna di Grado e Marano*. Magistrato delle Acque. Ufficio Idrografico, Venezia.
- DYER K.R., CHRISTIE M.C., WRIGHT E.W., 2000. The classification of intertidal mudflats. *Continental Shelf Research* 20 (2000): 1039 – 1060.
- EUROPEAN COMMISSION, 2011. *Guidelines on the implementation of the Birds and Habitats Directives in coastal zones*. [http://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/management/docs/guidance\\_doc.pdf](http://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/management/docs/guidance_doc.pdf).
- FACHIN G., 2008. *Trasformazioni territoriali ed aspetti fisici di adattamento dell'ecosistema naturale delle lagune di Grado e Marano conseguenti all'innalzamento del livello del mare*. Tesi di laurea inedita, Università degli Studi di Trieste: 174 pp.
- FAGHERAZZI S., CARNIELLO L., D'ALPAOS L., DEFINA A., 2006. Critical bifurcation of shallow microtidal landforms in tidal flats and salt marshes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America PNAS*, 103 (22): 8337-8341.
- FAGHERAZZI S., PALERMO C., RULLI M.C., CARNIELLO L., DEFINA A., 2007. Wind waves in shallow microtidal basins and the dynamic equilibrium of tidal flats. *Journal of Geophysical Research*, 112: F02024.
- FASOLA M. & CANOVA L., 1991. Colony site selection by eight species of gulls and terns breeding in the "Valli di Comacchio" (Italy). *Italian Journal of Zoology*, 58(3): 261-266.
- FERLA, M. CORDELLA, L. MICHIELLI, A. RUSCONI, 2008. Analisi delle variazioni di lungo periodo del livello del mare dell'area nord adriatica e del regime di marea delle lagune di Venezia e di Marano-Grado. *L'Acqua*, 5 (2008), pp. 65–76
- FERRARIN C., UMGIESSER G., BAJO M., BELLAFIORE D., DE PASCALIS F., GHEZZO M., MATTASSI G., SCROCCARO I., 2010. Hydraulic zonation of the lagoons of Marano and Grado, Italy. A modeling approach. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 87: 561-572.



- FLEMMING B.W., 2003. Tidal flats. In Middleton G.V. (Ed.) *Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks*. Kluwer, Dordrecht: 734 – 737p.
- FOLK R.L., WARD W.C., 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3-26.
- FONTANA A., 2006. *Evoluzione geomorfologica della bassa pianura friulana e sue relazioni con le dinamiche insediative antiche*. Comune di Udine, Edizioni del Museo Friulano di Storia Naturale: 287 pp.
- FONTOLAN G., PILLON S., BEZZI A., DELLI QUADRI F., BURLA I., 2007. Coastal vulnerability assessment: the Grado and Marano barrier islands. *Convegno Nazionale Geolitalia 2007, Rimini 12-14 sett. 2007, Book of Abstracts, Epitome*, 2: 37.
- FONTOLAN G., BEZZI A., FACHIN G., PILLON S., 2010. *Le trasformazioni ambientali della Laguna di Grado e Marano*. Rapporto Tecnico 1-2010 per ARPA FVG: 75 pp.
- FONTOLAN G., PILLON S., BEZZI A., VILLALTA R., LIPIZER M., TRICHES A., D'AIETTI A., 2012. Human impact and the historical transformation of saltmarshes in the Marano and Grado Lagoon, northern Adriatic Sea. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 113: 41-56.
- GATTO F. & MAROCCO R., 1992. Caratteri morfologici ed antropici della Laguna di Grado (Alto Adriatico). *Gortania, Atti Museo Friulano di Storia Naturale*, 14: 19-42.
- GATTO F. & MAROCCO R., 1993. Morfometria e geometria idraulica dei canali della Laguna di Grado (Friuli Venezia Giulia). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 16: 107-120.
- GUSTIN M., BRAMBILLA M. & CELADA C., 2010. *Valutazione dello Stato di Conservazione dell'avifauna italiana. Volume I. Non-Passeriformes*. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Lega Italiana Protezione Uccelli (LIPU). 842 pp.
- GUZZON C., KRAVOS K., PANZARIN L., RUSTICALI R., SCARTON F., UTMAR P. & VALLE R., 2001. Volpoca (*Tadorna tadorna*) e loro-limicoli (Charadriiformes) nidificanti lungo la costiera nord-adriatica: situazione nel 1998-1999. *Bollettino del Museo civico di Storia naturale di Venezia*, 52: 183-191.
- KLEIN, G. DEVRIES, 1985. Intertidal flats and intertidal sand bodies. In: Davis, R.A. (Ed.) *Coastal Sedimentary Environments*. Springer, New York, 187-224p.
- LAMBECK, K., ANTONIOLI, F., PURCELL, A., SILENZI, S., 2004. Sea level change along the Italian coast for the past 10,000 yrs. *Quaternary Science Reviews*, 23: 1567-1598.
- LIANG Q., MARCHE F., 2009. Numerical resolution of well-balanced shallow water equations with complex source terms. *Advances in Water Resources*, 32, 873–84.
- LIBERIO N., 1990. *Studio sulla situazione altimetrica della zona compresa tra Latisana, Cervignano, Ronchi, Punta Sdobba, Grado, Porto Buso, Punta Tagliamento con la costituzione di nuovi capisaldi: relazione di sintesi*. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione regionale dei lavori pubblici, Trieste: 114 pp.
- LUÍS A., GOSS-CUSTARD J.D., MOREIRA M.H., 2001. A method for assessing the quality of roost used by waders during high tide. *Wader Study Group Bulletin*, 96: 71-73.
- MAROCCO R., 1988. Considerazioni sedimentologiche sui sondaggi S19 e S20 (Delta del Fiume Tagliamento). *Gortania*, 10: 101-120.
- MAROCCO R., 1989. Evoluzione quaternaria della laguna di Marano (Friuli-Venezia Giulia). *Il Quaternario*, 2 (2): 125-137.
- MAROCCO R., 1991. Evoluzione tardopleistocenica – olocenica del delta del F. Tagliamento e delle Lagune di Marano e Grado (Golfo di Trieste). *Il Quaternario*, 4 (1b): 223 -232.



- MAROCCO R. & PESSINA M., 1995. Il rischio litorale nell'area circumlagunare del Friuli Venezia Giulia. *Gortania*, 17: 5-35.
- MAROCCO R., PUGLIESE N., STOLFA D., 1984. Some remarks on the origin and evolution of the Grado Lagoon (Northern Adriatic Sea). *Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata*, 2 (1):11-17.
- MCCARTNEY B.L., 1985. Floating breakwater design. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 111 (2): 304-318.
- MEHTA A.J., 2014. *An introduction to hydraulics of fine sediment transport*. World scientific.
- MOORE F.R., KERLINGER P., SIMONS T.R., 1990. Stopover on a Gulf coast barrier island by spring trans-gulf migrations. *Wilson Bulletin*, 102 (3): 487-500.
- MORRIS R.K.A., 2011. The application of the Habitats Directive in the UK: compliance or gold plating? *Land Use Policy*, 28: 361–369.
- MORRIS R.K.A. & GIBSON C., 2007. Port development and nature conservation. Experiences in England between 1994 and 2005. *Ocean & Coastal Management*, 50: 443–462.
- NICHOLS M. M., 1989 - Sediment accumulation rates and relative sea-level rise in lagoon. *Marine Geology*, 88: 201- 219.
- PAGANIN A., 2016. *Zonizzazione sedimentologica della Laguna di Marano e Grado a fini gestionali*. Tesi di laurea triennale inedita, Università degli Studi di Trieste, A.A. 2015-2016: 52 pp.
- PAIVA V.H., RAMOS J.A., CATRY T., PEDRO P., MEDEIROS R., PALMA J., 2006. Influence of environmental factors and energetic value of food on Little Tern *Sterna albifrons* chick growth and food delivery: Capsule Chick diet and early growth parameters differed between birds breeding on natural (sandy beaches) and alternative (salinas) habitats. *Bird Study*, 53(1): 1-11.
- PALERM J., 2006. The Habitats Directive as an instrument to achieve sustainability? An analysis through the Rotterdam Mainport Development Project. *European Environment*, 16: 127–138.
- PARTHENIADES E., 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(1):105–139
- PETERS K. A. & OTIS D.L., 2007. Shorebird roost-site selection at two temporal scales: is human disturbance a factor? *Journal of Applied Ecology* 44: 196-209.
- PILKEY O.H. & FRASER M.E., 2003. *A celebration of the World's Barrier islands*. Columbia University Press. 309 pp.
- POLDINI, L., ORIOLO, G., VIDALI, M., TOMASELLA, M., STOCH, F., OREL, G., 2006. Manuale degli habitat del Friuli Venezia Giulia. *Strumento a supporto della valutazione d'impatto ambientale (VIA), ambientale strategica (VAS) e d'incidenza ecologica (VIEc)*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direz. Centrale Ambiente e Lavori Pubblici, Servizio valutazione impatto ambientale, Università degli Studi Trieste – Dipartimento di Biologia.
- PRANOVI F., DA PONTE F., RAICEVICH S., GIOVANARDI O., 2004. A multidisciplinary study of the immediate effects of mechanical clam harvesting in the Venice Lagoon. *ICES J Mar Sci*; 61 (1): 43-52.
- PROTEZIONE CIVILE REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 2005. *Indagine sullo stato degli argini della bassa pianura tra le foci del Tagliamento e del Timavo, con particolare riferimento all'arco lagunare*. Trieste: 117pp.
- PROTEZIONE CIVILE REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 2010. *Primi interventi di protezione civile in relazione al rischio di ingressione marina nelle aree costiere del Friuli Venezia Giulia*



e di esposizione al rischio della popolazione rispetto ad un evento meteo-marino estremo. Presentazione svolta a Palmanova il 26 febbraio 2010.

[http://www.protezionecivile.fvg.it/ProtCiv/GetDoc.aspx/48744/Rischio%20laguna\\_GB\\_2010\\_giornali.pdf](http://www.protezionecivile.fvg.it/ProtCiv/GetDoc.aspx/48744/Rischio%20laguna_GB_2010_giornali.pdf)

PWA, 1994. *Physical criteria for defining success: a review of the physical performance of tidal marshes constructed with dredged materials in San Francisco Bay, California*. San Francisco, California: Philip Williams and Associates Ltd.

RAY G.L., 2000. Infaunal assemblages on constructed intertidal mudflats at Jonesport, Maine (USA). *Marine Pollution Bulletin*, 40 (12): 1186–1200.

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 1979. *Studio dell'assetto fluviale e costiero della Regione Friuli Venezia Giulia* (a cura di Electroconsult e Studio Volta).

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 2012a. *Formulario IT3320037 Laguna di Marano e Grado*. <http://www.regione.fvg.it/rafvfg/cms/RAFVFG/ambiente-territorio/tutela-ambiente-gestione-risorse-naturali>.

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 2012b. *Rete Natura 2000 in Friuli Venezia Giulia. Piano di Gestione del SIC/ZPS IT3320037 Laguna di Marano e Grado*. Relazione di Piano, 322 pp..

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 2012c. *Piano del Turismo Sostenibile ad integrazione del Piano di Gestione del Sito Natura 2000 IT3320037 Laguna di Marano e Grado*. Redatto da Eco&Eco di Bologna in RTI con Sinergheia Gruppo. Relazione finale a cura di Francesco Silvestri, Andrea Malacchini e Marco Magalotti. Pp. 121.

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 2015a. *Monitoraggio delle specie di Ciconiformi, Falacrocoracidi e Caradriformi nidificanti nella zona costiera del Friuli Venezia Giulia, SIC IT3340006 Carso triestino e goriziano, ZPS IT3341002 Aree carsiche della Venezia Giulia, SIC e ZPS IT3330006 Valle Cavanata e Banco della Mula di Muggia, SIC e ZPS IT3320037 Laguna di Marano e Grado*. Relazione finale a cura del dott. Stefano Sponza, Dipartimento di Matematica e Geoscienze, Università di Trieste. Pp. 89.

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 2015b. *Monitoraggio di alcune specie di uccelli acquatici nidificanti di interesse comunitario (Falacrocoracidi e Caradriformi) nella zona costiera del Friuli Venezia Giulia*. Relazione finale a cura del dott. Stefano Sponza, Dipartimento di Matematica e Geoscienze, Università di Trieste. Pp. 53.

ROELVINK, J.A., 2006. Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering*, 53(2):277–287.

ROGERS D.I., BATTLE P.F., PIERSMA T., VAN GILS J.A., ROGERS K.G., 2006. High-tide habitat choice: insights from modelling roost selection by shorebirds around a tropical bay. *Animal Behaviour*, 72: 563-575.

ROSATI J.D., 2009. *Concepts for Functional Restoration of Barrier Islands*. Report of U.S. Army Engineer Research and Development Center, Environmental Laboratory, 14 pp.

SACCOMANI C., 2009. *Studio sperimentale, su modello fisico, dell'efficienza di frangiflutti galleggianti*. Tesi di laurea, Università di Pisa: 95 pp.

SARRETTA A., PILLON S., MOLINAROLI E., GUERZONI S., FONTOLAN G., 2010. Sediment budget in the Lagoon of Venice. *Continental Shelf Research*, 30 (8): 934-949.

SCARTON F., 2008. Population Trend, Colony Size and Distribution of Little Terns in the Lagoon of Venice (Italy) between 1989 and 2003. *Waterbirds*, 31: 35-41.



- SCARTON F. & MONTANARI M., 2015. Use of artificial intertidal sites by birds in a Mediterranean lagoon and their importance for wintering and migrating waders. *Journal of Coastal Conservation*, 19(3): 321-334.
- SCARTON F., DAY J.W.JR, RISMONDO A., CECCONI G., ARE, D., 2000. Effects of an intertidal sediment fence on sediment elevation and vegetation distribution in a Venice (Italy) lagoon saltmarsh. *Ecological Engineering*, 16: 223–233.
- SCARTON F., CECCONI G., CERASUOLO C. & VALLE R., 2013. The importance of dredge islands for breeding waterbirds. A three-year study in the Venice Lagoon (Italy). *Ecological Engineering*, 54: 39-48.
- SMAGORINSKY J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations. *Mon. Wea. Rev.*, 91, 99–164.
- SNOW D.W & PERRINS C.M., 1998. *The Birds of the Western Palearctic*. Concise Edition based on The Handbook of the Birds of Europe, the Middle East, and North Africa. 1. Non- Passerines. Published by Oxford: Oxford University Press.
- SOULSBY R.L., 1995. Bed shear-stresses due to combined waves and current, *Advanced in Coastal Morphodynamics*, Eds: Stive MJF, De Vriend HJ, Fredsøe J, Hamm L, Soulsby RL, Teisson C and Winterwerp JC, pp 4-20 a 4-23, Delft Hydraulics, Delft NL.
- SOULSBY R.L., 1997. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. *Thomas Telford*.
- SPONZA S., UTMAR P., ROPPA F., COSOLO M., VENTOLINI N., SISTO A., FERRERO E.A., 2009. Studio sfruttamento e impatto delle praterie di fanerogame. In: Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, *Progetto ANSER Ruolo ecologico delle zone umide per la sosta e lo svernamento degli uccelli acquatici nell'Adriatico settentrionale: linee guida per la conservazione e la gestione del patrimonio naturale costiero – Relazione Finale*. Interreg IIIA Transfrontaliero Adriatico: 157-296.
- SPONZA S., COSOLO M., MENON S., MARTINUCCI D., PILLON S., FATTORI U., 2015. La Beccaccia di mare nella Laguna di Marano e Grado: consistenza della popolazione e scelta dell'habitat. XVIII *Convegno Italiano di Ornitologia*, Caramanico Terme (PE), 17 al 20 settembre 2015, Pesaro.
- STONE G.W. & MC BRIDE R.A., 1998. Louisiana barrier islands and their importance in wetland protection: forecasting shoreline change and subsequent response of wave climate. *Journal of Coastal Research*, 14 (3): 900-915.
- SWAN Team, 2013. SWAN Scientific and Technical Documentation, *Delft University of Technology*.
- TEETER A.M., 1986. Vertical transport in fine-grained suspension and newly-deposited sediment. *Estuarine cohesive sediment dynamics*, pages 170–191. Springer.
- THIELER E.R., HIMMELSTOSS E.A., ZICHICHI J.L., ERGUL A., 2009. *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. Open-File Report 2008-1278, U.S. Geological Survey.
- TORO E. F., 2001. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. A practical introduction. *Ed Springer*.
- TRICHES, A., PILLON, S., BEZZI, A., LIPIZER, M., GORDINI, E., VILLALTA R., FONTOLAN G., MENCHINI G., 2011. *Carta batimetrica della Laguna di Marano e Grado*. Arti Grafiche Friulane, Imoco spa (UD): 39 pp. + 5 Maps.
- ULLIANI A., 2015. *Struttura morfologica, dinamica evolutiva e indicatori gestionali delle isole – barriera della Laguna di Marano e Grado*. Tesi di laurea inedita, Università degli studi di Trieste, A.A. 2014-2015.



UTMAR P., SPONZA S., ZANUTTO I., 2007. *Gimme Shelter*: uccelli acquatici a rischio nella zona costiera del Friuli Venezia Giulia tra la foce del Timavo e la foce del Tagliamento. In: AA.VV. - *Linee guida e casi di studio per la gestione dei siti della rete Natura 2000 in ambienti di transizione*. Atti workshop Grado, giugno 2006. Edizioni Università di Trieste: 374-390.

VAN RIJN L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, volume 1006. *Aqua publications Amsterdam*.

WHITEHOUSE R.J.S., SOULSBY R.L., ROBERTS W. AND MITCHENER H.J., 2000. Dynamics of estuarine muds. *Technical Report. Thomas Telford*.

WINTERWERP J.C., VAN KESTEREN W.G.M, 2004. Introduction to the physics of cohesive sediment dynamics in the marine environment. *Elsevier*, volume 56.

IL PRESIDENTE

IL SEGRETARIO GENERALE