

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

**XXVI CICLO DEL DOTTORATO DI RICERCA IN
GEOSCIENZE**

**LE BARENE DELLA LAGUNA DI MARANO E
GRADO: ANALISI DEGLI ASPETTI MORFO-
EVOLUTIVI NELLA PROSPETTIVA GESTIONALE**

Settore scientifico disciplinare: GEO/04 - Geografia fisica e Geomorfologia

**DOTTORANDA
ANNELORE BEZZI**

**COORDINATORE
PROF. GIOVANNI COSTA**

**SUPERVISORE DI TESI
PROF. GIORGIO FONTOLAN**

ANNO ACCADEMICO 2012 / 2013

Indice	Pag.
Introduzione	1
1. Le barene	3
1.1. Introduzione	3
1.2. Morfologia	5
1.3. Tipologie e classificazione	7
1.4. I sedimenti	10
1.5. L'innalzamento del livello del mare	11
2. L'area di studio	13
2.1. Inquadramento	13
2.2. Origine, evoluzione e geomorfologia	16
2.3. Distribuzione dei sedimenti	18
3. Studio in aree campione: aspetti morfologici, evolutivi e sedimentologici	23
3.1. Scelta delle aree campione	23
3.2. Materiali e metodi	24
3.2.1. Rilievo topografico	24
3.2.2. Sedimenti	27
3.3. Morfologia ed evoluzione	30
3.3.1. Risultati	30
3.3.2. Interpretazione dei risultati	51
3.4. Sedimenti	52
3.4.1. Risultati delle analisi sedimentologiche	52
3.4.2. Analisi statistica	54
3.4.3. Interpretazione dei risultati granulometrici	59
3.4.4. Analisi di facies	60
4. Analisi a macroscala	69
4.1. Introduzione	69
4.2. Strumenti utilizzati	69
4.3. Metodi di analisi	73
4.3.1. Analisi per gruppi	74
4.3.2. Analisi topologica delle superfici e dei margini	76
4.3.3. Il geodatabase	77
4.3.4. Bilanci di bacino	79
4.4. Distribuzione e classificazione delle barene	79
4.5. Individuazione di differenti tipologie morfoevolutive	84
4.6. Evoluzione complessiva delle barene e analisi per gruppi	91
4.7. Quantificazione dei processi	96

4.8. Confronto con i bilanci di bacino	107
5. La prospettiva gestionale	115
5.1. Principi base	115
5.2. Utilizzo del geodatabase	117
5.3. Strategie e tecniche possibili	119
5.4. Applicazione ai contesti evolutivi individuati	121
5.5. La ricostruzione di barene	124
6. Conclusioni	125
Bibliografia	128

Introduzione

Le barene sono una morfologia tipica degli ambienti dominati dalla marea, la cui gestione e conservazione sono considerate un obiettivo di fondamentale importanza in molti paesi. Vista la loro natura strettamente legata all'escursione di marea, all'apporto sedimentario e alla vegetazione, la conoscenza dei caratteri fisici, in particolare morfodinamici e sedimentologici appare necessaria anche a fini conservazionistici e gestionali.

In Italia le barene sono presenti quasi esclusivamente in Nord Adriatico associate a una serie di ambienti lagunari di importanza cruciale, in un'area geografica caratterizzata da un incremento del livello relativo del mare tra i più alti (Kent et al., 2002; Lambeck et al., 2004; Antonioli e al., 2009) e dove le modificazioni e le pressioni indotte dalle attività antropiche influenzano in maniera significativa l'evoluzione morfodinamica dell'ambito costiero.

Il caso più noto è la laguna di Venezia, dove la tendenza trasgressiva esasperata dalla subsidenza antropica e il bilancio sedimentario fortemente negativo hanno determinato, durante l'ultimo secolo, un progressivo deterioramento morfologico del quale la manifestazione più evidente è stata la scomparsa di più del 50% delle superfici a barena (Molinarioli et al., 2009; Sarretta et al., 2010). Nel tentativo di contrastare questo fenomeno sono stati realizzati numerosi e diversificati interventi di protezione e ricostruzione delle barene, dagli esiti controversi, che rappresentano il caso italiano di una vasta opera diffusa a livello internazionale che vede l'applicazione di diverse filosofie gestionale e di numerose tecniche.

Il riconoscimento del cambiamento climatico in atto e del conseguente innalzamento del livello del mare rende gli ambienti transizionali in genere e le barene in particolare, degli ambienti in cui la soglia di attenzione deve essere necessariamente mantenuta molto elevata; la loro tutela passa necessariamente attraverso la conoscenza dei diversi aspetti che li caratterizzano e la comprensione delle tendenze in atto in risposta sia all'innalzamento del livello del mare, sia alle forzanti a carattere più locale ma non per questo spesso meno importanti.

La laguna di Grado e Marano offre in questo senso una buona opportunità di studio, poiché si colloca nella medesima area geografica rispetto a quella di Venezia, ma è rispetto a questa, molto meno nota e studiata. L'importanza ecologica e naturalistica vi si accompagna a una secolare interazione con le attività antropiche e a una scarsità di dati aggiornati sugli aspetti fisici (vento, moto ondoso, apporti dal bacino scolante), parzialmente implementati solo di recente.

Le criticità ambientali (contaminazione da mercurio) e alcuni palesi fenomeni morfologici in atto quali l'interrimento dei canali hanno, negli ultimi decenni, acceso il dibattito da parte dell'opinione pubblica

e delle amministrazioni. Di qui la necessità di approfondire alcune tematiche per aumentare il livello di conoscenza di base su questo ambiente.

Per questi motivi si è deciso di affrontare uno studio delle barene della laguna di Marano e Grado basandosi su due differenti approcci.

Da un lato uno studio morfologico, evolutivo, topografico e sedimentologico compiuto su una serie di aree campione, per quanto possibile rappresentative delle diverse tipologie di barene presenti. Dall'altro uno studio a macroscale esteso su tutta la laguna che parte dall'analisi di foto aeree, unico strumento disponibile per verificare quanto successo a partire dagli anni '50, e nel quale vengono utilizzate diverse tecniche di analisi in ambiente GIS e alcune originali proposte di classificazione.

1 LE BARENE

1.1 Introduzione

Le barene rappresentano una tra le morfologie più diffuse e tipiche dei bacini di marea presenti lungo le coste a bassa energia o degli specchi d'acqua costieri protetti dall'azione diretta del moto ondoso da spit e isole barriera. Esse 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*) infatti 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*.



Figura 1.1 - Barene della laguna di Grado.

La sommersione periodica e lo sviluppo di specie vegetali tolleranti al sale rappresentano quindi le principali condizioni per lo sviluppo di una barena. La vegetazione riveste un ruolo fondamentale nella crescita e nella stabilizzazione della struttura della barena: da un lato i fusti e le foglie delle piante, rallentano la propagazione del flusso di marea e favoriscono la sedimentazione del materiale sospeso, dall'altro le radici, trattenendo il sedimento, ne impediscono la ripresa in sospensione e quindi l'erosione.

La stretta dipendenza tra gli aspetti morfo-sedimentologici, la marea e lo sviluppo della vegetazione fanno sì che le condizioni di sviluppo di ambienti assimilabili a una barena si verificano in misura differente in un intervallo spaziale definito dai limiti di alta e bassa marea. Verso il limite inferiore di questo intervallo la sommersione troppo prolungata limita la crescita della vegetazione, mentre verso quello superiore inizia la competizione con le piante terrestri (Carter, 1988).

Alle quote intermedie i sedimenti vengono colonizzati da specie vegetali diverse che possono essere distribuite in fasce ad andamento regolare, ma in molti casi anche costituire un mosaico apparentemente disordinato.

Le aree (che molti Autori individuano come barene s.s.) le cui quote si pongono sopra il livello medio delle alte maree e che vengono quindi sommerse solo durante le alte maree sizigiali vengono usualmente definite come *barena alta* (Adnitt et al., 2007), anche se alcune barene possono avere quote superiori a quelle delle alte maree sizigiali come risultato di amplificazioni del livello dell'acqua da parte dei venti (Bartholdy, 2012). Le aree, poste a quote inferiori a quelle delle alte maree possono invece venir inondate a ogni ciclo mareale e vengono spesso indicate con il nome di *barena bassa* (Adnitt et al., 2007).

Lo sviluppo in altezza delle barene dipende da tre fattori (Carter, 1988): tipologia e quantità di sedimenti, distribuzione ed entità delle correnti di marea, capacità della vegetazione di intrappolare il sedimento.

Durante le fasi embrionali dello sviluppo di una barena, a partire da una piana di marea, i processi di sedimentazione sono favoriti dalla presenza di strati algali che favoriscono l'adesione delle particelle di sedimento fine attraverso le proprie secrezioni mucose (Pethick, 1984). La successiva colonizzazione da parte di piante superiori avviene in genere attraverso la coalescenza di piccole aree discrete (*patches*) di vegetazione che si espandono fino a formare un continuo tappeto erboso (Carter, 1988; Bartholdy, 2012).

Successivamente la differente capacità delle diverse specie vegetali di catturare il sedimento in sospensione può rappresentare un meccanismo di feedback e favorire l'innalzamento di quota di alcune aree rispetto ad altre e quindi provocare una certa complessità morfologica (Carter, 1988). Con lo sviluppo in dimensioni ed elevazione della barena si ha l'accumulo di nuovo materiale, che va ad incrementare la quota topografica della nuova superficie barenale, favorendo l'ulteriore sviluppo della

barena e della vegetazione. Quando però l'innalzamento di quota supera un certo livello, la frequenza delle sommersioni diminuisce e con essa anche l'apporto sedimentario, si assiste quindi a un rapido declino nei tassi di accrescimento (Pethick, 1981; Carter, 1988).

1.2 Morfologia

Dal punto di vista morfologico la barena è generalmente costituita da una piattaforma, che può presentarsi nell'insieme leggermente concava o convessa (Allen, 2000), ma nello stesso tempo è resa accidentata da un microrilievo e da un mosaico di specie vegetali differenti (Carter, 1988).

Le morfologie più evidenti e importanti associate alle barene sono i ghebi (*marsh creeks*), una rete di canali tidali 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. Le aree a sedimentazione più elevata sono proprio i bordi dei ghebi (*levees*) dove avviene maggior accumulo di sedimento (Carter 1988; Adnitt et al. 2007). Man mano che la barena aumenta di elevazione il fondo dei ghebi mantiene la propria quota e quindi essi appaiono maggiormente incavati rispetto alla superficie della barena. Nel loro insieme formano una rete di canali ciechi e ramificati che visti in pianta possono assumere varie forme; Pye & French (1993) ne hanno classificate sette tipi diversi (descrivendo le barene della Gran Bretagna) associandole a vari fattori quali la pendenza della superficie originaria, la tipologia di sedimento disponibile, l'età del sistema e le interferenze antropiche (Fig. 1.2). La sequenza morfologica che comprende una rete lineare, lineare dendritica, dendritica, dendritica meandreggiante viene inoltre spesso vista come una sequenza temporale che porta verso la maturità della barena.

Altre morfologie frequenti sono i chiari (*salt pans*): aree depresse prive di vegetazione che possono essere associati o meno a un reticolo di ghebi. In base alla loro origine, non ancora del tutto chiarita, possono essere distinti:

- i *primary pan*, di forma tondeggiante, probabilmente legati alle prime fasi di sviluppo di una barena, quando a partire da chiazze prive di vegetazione si sviluppano condizioni ipersaline che impediscono definitivamente la crescita della vegetazione (Pethick, 1984);
- i *channel pan*, dalla forma più allungata e dai bordi più frastagliati, che richiama quella dei ghebi stessi e che Bird (2000) associa a ghebi abbandonati.

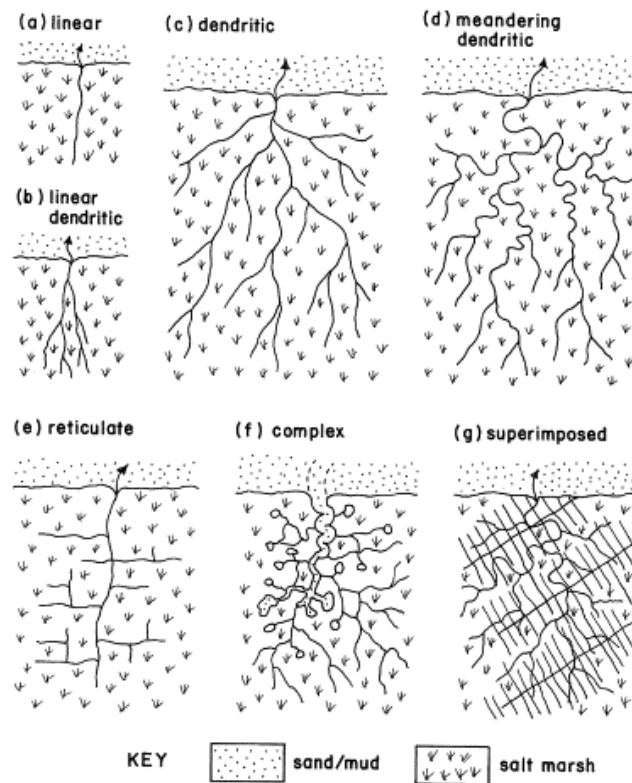


Figura 1.2 - Differenti tipologie di distribuzione dei ghebi
(da Pye & French, 1993, riportato in Allen 2000).

I margini esterni delle barene possono essere costituiti da superfici debolmente inclinate digradanti verso le piane di marea, ma sono più spesso rappresentati da una ripida scarpata o da un gradino di altezza variabile. Queste morfologie vengono spesso associate a uno stato morfodinamico della barena (Fig. 1.3), nel tentativo di utilizzare la morfologia del margine come un indicatore dei processi in atto e identificarne la forzante prevalente (Allen, 1993). I primi vengono associati a uno stato accrescitivo (a), i secondi a uno stato erosivo, che può essere però anche di lieve entità, con l'azione delle onde o delle correnti che agisce su un lungo periodo, soprattutto in condizioni di bassa marea (b). Il terzo caso (c) è rappresentato da una situazione intermedia in cui l'erosione si esplica morfologicamente soprattutto in termini di espressione planimetrica, con un andamento a baie promontori molto accentuato attribuibile a erosione episodica in condizioni di ondazione relativamente elevata (c).

Altri Autori evidenziano però la diffusione di margini ripidi anche al di fuori di contesti nettamente erosivi, dove gli stessi possono essere invece considerati un indice di maturità della barena (Marshall, 1962). In questi casi la barena che non si accresce più lateralmente, aumenta invece di quota elevando così il suo bordo rispetto ai fondali circostanti. Non si tratterebbe quindi necessariamente di indicatori di un processo erosivo in atto.

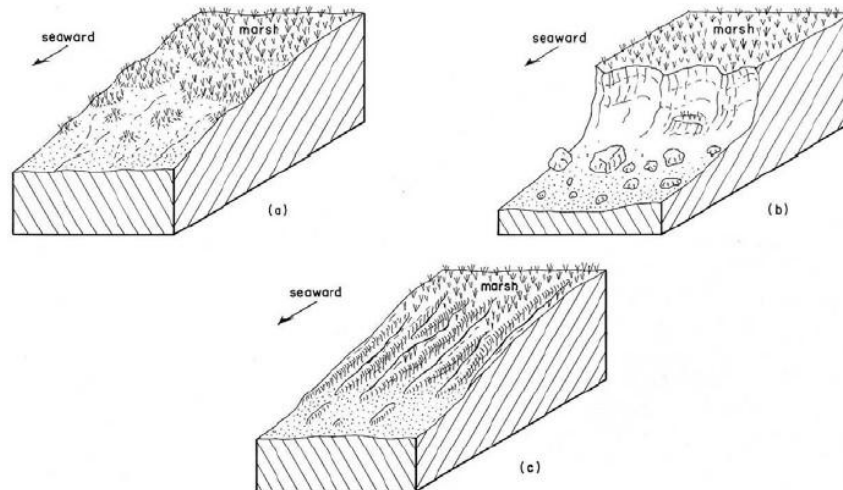


Figura 1.3 - Differenti tipologie di margine di barena: (a) transizione graduale tra barena e piana di marea, (b) scarpata erosiva, (c) piano inclinato con andamento a baie e promontori (da Allen, 1993).

1.3 Tipologie e classificazione

Vari Autori propongono una classificazione delle barene in differenti tipologie, basate soprattutto sulla loro posizione geografica o in relazione ad altri elementi morfologici costieri. La posizione delle barene è determinata infatti in prima istanza dalla esistenza di condizioni protette, condizionate dalla tipologia di ambiente costiero. Ogni ambiente, a partire da un'ampia gamma di livelli energetici e di fattori locali (dinamiche tidali, trasporto sedimentario, energia del moto ondoso, presenza/assenza di vegetazione), determina diverse distribuzioni delle morfologie barenali.

Allen (2000) riporta la classificazione proposta da Pye & French (1993) per le barene europee (Fig. 1.4):

- a) Barene di costa aperta: sistemi sabbiosi associati a piane costiere parzialmente esposte al moto ondoso.
- b) Barene di retrobarriera in coste aperte: sistemi sabbiosi ma anche fangosi che si sviluppano sul lato protetto di isole barriera e/o spit.
- c) Barene di baia aperta: bordano i limiti di ampie baie a dinamica tidale con aperture aperte verso il mare, tende a prevalervi la frazione sabbiosa.
- d) Barene di baia parzialmente ostruita da spit o promontori: sistemi misti sabbioso / fangosi.
- e) Barene al margine di estuari: prevalentemente fangose.

- f) Retrobarriera all'interno di estuari: sistemi misti sabbioso / fangosi che si sviluppano sul lato protetto di isole barriera e/o spit che chiudono parzialmente sistemi estuarili.
- g) Barena di testata di ria: casi limitati presenti all'interno delle ria.

Oertel & Woo (1994) hanno proposto un interessante modello di classificazione gerarchica delle barene, basata su aspetti genetici e di relazione con l'ambiente lagunare di riferimento. L'abbondanza o meno di morfologie a barena appare dipendente dalla tipologia di laguna che a seconda della genesi, del grado di confinamento (presenza o meno di forme che occludono lo specchio acqueo) e della conseguente conformazione ipsometrica assume caratteri favorevoli o meno allo sviluppo di queste morfologie. Gli Autori hanno individuato tre distinte aree all'interno della laguna che possono essere sede di sviluppo della morfologie di barena: bordi lagunari, zona centrale, isole barriera.

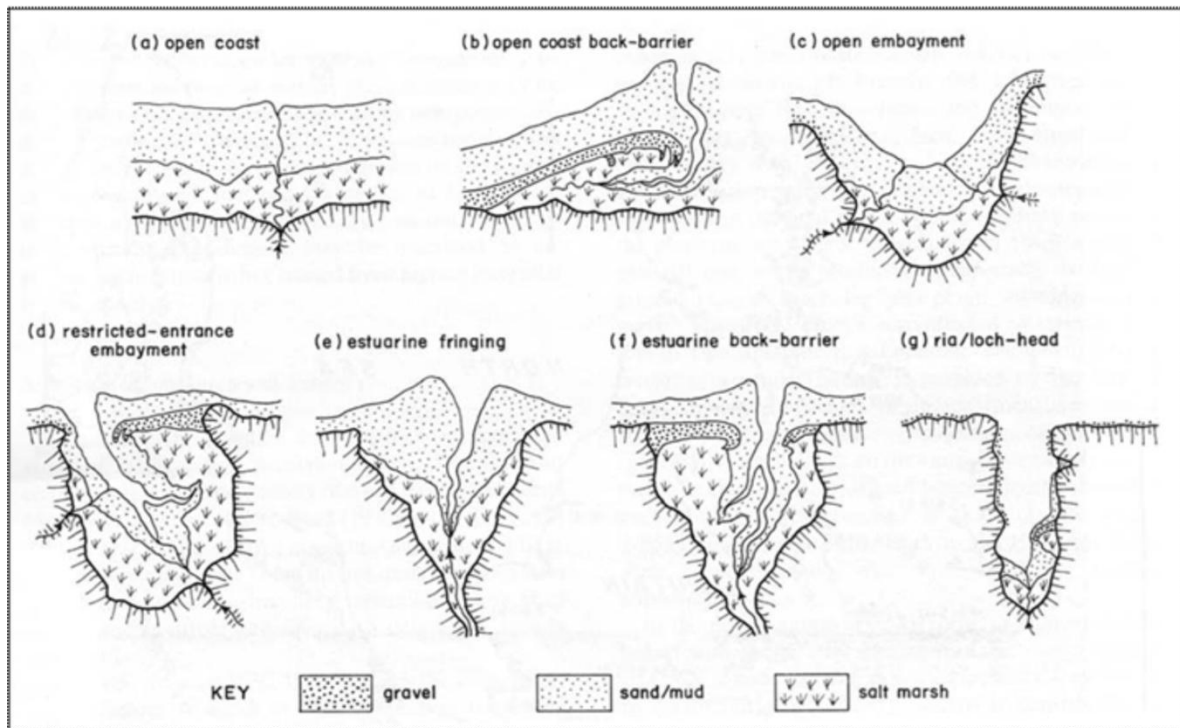


Figura 1.4 - Classificazione geomorfologica delle barene
(da Pye and French, 1993, riportata in Allen, 2000).

Ciascuna di questa zone presenta differenti tipologie di barene la cui distribuzione, morfologia ed evoluzione nel tempo dipendono dalle forme originarie (linea di costa interna della laguna, presenza di morfologie relitte all'interno del bacino lagunare, conformazione delle isole barriera) e si modificano in

relazione ai processi morfodinamici lagunari e costieri, fortemente vincolate dalla ipsometria delle differenti parti del bacino lagunare.

In Italia lo sviluppo di barene è quasi esclusivamente associato agli ambiti lagunari nord adriatici: soprattutto nella laguna di Venezia e in quella di Grado e Marano, oggetto di questo lavoro. È proprio alla realtà veneziana che si deve la nascita del termine italiano “barena” di cui una definizione “ufficiale” è quella adottata dall’*Ufficio Idrografico del Magistrato delle Acque di Venezia*, che le indica come *le zone poste ad una quota maggiore di zero, inteso come medio mare corrente, sommergibili solamente durante le alte maree* (Rusconi, 1987).

Per la laguna di Venezia Bonometto (2003) ha proposto l’identificazione delle seguenti tipologie di barena, descritte a partire da lavori precedenti di altri Autori (Albani et al. 1983, 1984; Favero et al. 1980, 1983) e basate su aspetti genetici e sedimentologici a carattere fortemente locale:

- Barene di margine lagunare: derivate da tratti ancora emergenti dell’antica pianura costiera alluvionale invase e permeate dalle acque salmastre; localizzate lungo la gronda lagunare verso la terraferma, contraddistinte da depositi continentali a cui si sovrappone un sottile strato di materiale lagunare.
- Barene di ingressione marina: formatesi in zone un tempo caratterizzate dalla presenza di paludi d’acqua dolce e in seguito invase dalle acque marine. Queste ingressioni hanno favorito la formazione di estese barene, ma anche la costipazione dei sedimenti torbosi accentuando i fenomeni di subsidenza e quindi i processi erosivi.
- Barene di canale lagunare: trovano origine lungo i margini dei canali principali, in particolare nelle zone di confluenza. Le contraddistingue una tipica morfologia allungata nel senso della direzione dell’alveo. Verso il canale presentano un evidente e ripido gradino (ciglio) che si innalza per circa 30-35 cm sul livello del mare (Albani et al., 1984; figura 1.5), alimentato da un processo di sedimentazione attivo. Segue, nella zona di retrociglio, un digradare progressivo della superficie con chiari spesso aperti alle zone di velma retrostanti. Il margine segue fedelmente l’andamento del canale, funzionando come un vero e proprio argine naturale. Indagini sedimentologiche (Albani et al., 1984) hanno evidenziato un’origine del sedimento prettamente marina.

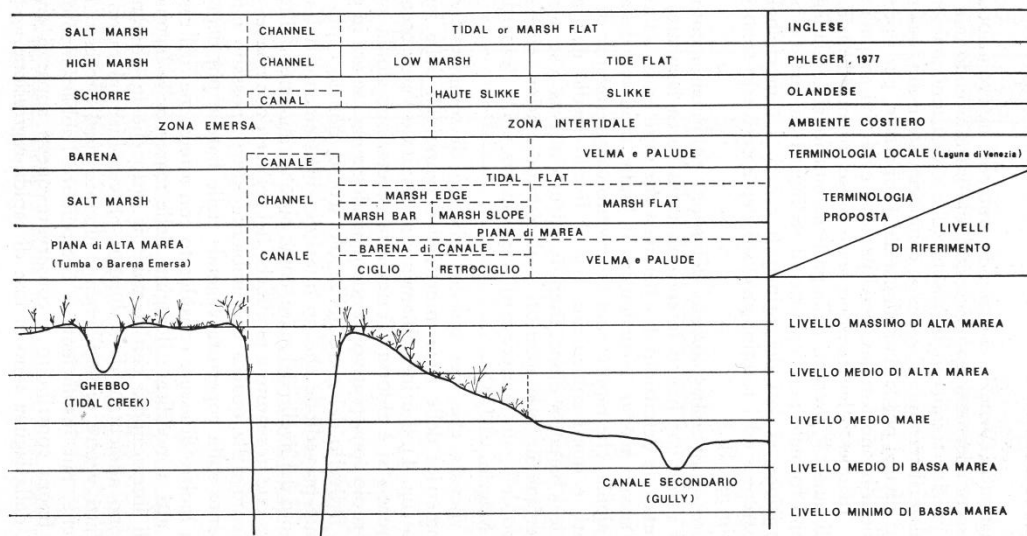


Figura 1.5 - Sezione tipo di una barena di margine di canale con indicate le parti che la compongono (da Albani et al., 1984).

1.4 I sedimenti

La sopravvivenza di una barena è strettamente legata, come abbiamo visto, all'apporto sedimentario a opera delle correnti di marea, che possono portare con sé un differente carico solido a seconda di condizioni ambientali variabili sia nel tempo che nello spazio (vicinanza alle sorgenti sedimentarie, propagazione della marea, eventi di moto ondoso con risospensione).

La deposizione del sedimento dipende dalla diminuzione della velocità del flusso della corrente, soprattutto grazie alla rugosità indotta dalla presenza della vegetazione, in seguito alla quale il sedimento si deposita per decantazione dal carico sospeso.

I sedimenti che compongono le barene sono in genere sedimenti fini (silt e argilla) che possono contenere una quantità più o meno elevate di sedimenti più grossolani (sabbia) e materiale organico. La granulometria tende a diminuire con l'aumentare della distanza nella direzione del flusso (Albani et al., 1984; Bartholdy, 2012).

Nelle barene a prevalenza siltosa la sostanza organica sedimenta in parte assieme al silt e in parte viene prodotta in loco dalle piante. Alcune specie alofite hanno la capacità di espellere sali dai tessuti, aumentando in questo modo la salinità dell'acqua e favorendo la flocculazione dei solidi sospesi. Nelle barene torbose vi è invece una prevalenza della produzione di biomassa e i processi biogenici prevalgono su quelli sedimentari (Allen, 2000).

I processi di sedimentazione che coinvolgono le barene possono essere di tre tipi (Bartholdy 2012):

- associati al flusso di acqua e sedimento all'interno dei ghebi

- associati al flusso laminare sulla superficie vegetata della barena
- associati ai margini esposti

Nel primo caso la sedimentazione può essere simile a quella che si verifica in ambiente fluviale con depositi di *point bar* e di *natural levees*, con differenze determinate dalla bidirezionalità alternata tipica delle correnti mareali.

Nel momento di stanca dell'alta marea l'acqua rimane ferma al di sopra della superficie vegetata della barena e il sedimento può depositarsi, in una quantità che appare direttamente collegata alla distanza dai ghebi o dai margini della barena. I processi erosivi possono in alcuni casi coinvolgere questi sedimenti ma essi tendono ad agire con maggiore efficacia sui margini delle barene direttamente investiti dalle onde (Reed, 1988).

1.5 L'innalzamento del livello del mare

L'innalzamento del livello del mare negli ultimi 100-200 anni è di particolare interesse dal punto di vista della gestione della fascia costiera e delle aree di transizione, di cui le barene costituiscono una parte così importante.

Vista la loro collocazione all'interno di una parte ben definita della fascia intertidale è logico aspettarsi che una sua traslazione possa avere significative ripercussioni sulle barene stesse. Essa può essere diretta conseguenza di una modifica del livello del mare sia assoluto che relativo.

Le relazioni tra accrescimento delle barene e livello del mare vengono studiate con varie metodologie e sono di ausilio per comprendere e quantificare le variazioni del livello del mare (Allen, 2000) a scala locale. Il rateo di accrescimento verticale delle barene viene quantificato attraverso differenti metodologie come il riconoscimento di marker archeologici, l'utilizzo di marker appositamente introdotti, l'analisi dei radioisotopi (carbonio, piombo, cesio) o di particolare contaminanti di origine antropogenica (Allen, 2000).

La risposta delle barene all'innalzamento del mare non è però un tema di semplice e univoca trattazione. La sedimentazione sulle barene può infatti riuscire o meno a controbilanciare l'innalzamento del livello del mare. In molte località nel mondo una rapida erosione delle barene è stata associata a un significativo innalzamento del livello del mare (Kearney et al., 1988; Reed, 1995; Day et al., 1999; Hartig et al., 2002; Van der Wal & Pye, 2004; Baily & Pearson, 2007; Ravens et al., 2009).

In altri casi invece il mutuo bilancio tra innalzamento relativo del livello del mare, autocompattazione dei sedimenti e tasso di sedimentazione (Cahoon et al. 1995; Allen, 2000) ha reso le barene capaci di accrescersi a un tasso uguale a quello dell'innalzamento del livello del mare e conservarsi nel tempo (Orson et al., 1987; Reed, 1988; Nielsen & Nielsen, 2002).

Altri Autori hanno evidenziato una risposta molto suscettibile alle forzanti locali (Day et al, 1998), sia naturali che legate all'azione antropica (Schwimmer & Pizzuto, 2000; Adam, 2002; Cox et al., 2003), con presenza di fenomeni accrescitivi anche in bacini con deficit sedimentario e con diffusi contesti erosivi (Reed, 1995). In caso di apporti sedimentari insufficienti infatti una certa compensazione può arrivare ad esempio dall'erosione della parti basse delle barene, il cui sedimento può andare a ridistribuirsi sulla parte alta.

Nella laguna di Venezia, l'unico caso italiano finora studiato, la tendenza trasgressiva esasperata dalla subsidenza antropica e il bilancio sedimentario fortemente negativo hanno determinato, durante l'ultimo secolo, un progressivo deterioramento morfologico con forte riduzione delle superfici a barena (Favero, 1992; Day et al, 1998; Ravera, 2000; Pillon et al., 2003; Sfriso et al., 2005; Molinaroli et al., 2009; Sarretta et al., 2010).

La perdita di barene (più del 50% in termini di estensione, dal 1927 al 2002 secondo Sarretta et al. (2010) ha dato spunto a una vasta quanto diversificata opera di protezione e ricostruzione delle barene, con esiti spesso controversi (Cecconi, 1995; Bonometto, 2003).

2 L'AREA DI STUDIO

2.1 Inquadramento

La laguna di Marano e Grado si colloca nell'area Nord Adriatica in un contesto morfodinamico molto simile a quello del caso molto più noto e studiato della laguna di Venezia. L'importanza ecologica e naturalistica vi si accompagna a una secolare interazione con le attività antropiche e a una scarsità di dati aggiornati sugli aspetti fisici (vento, moto ondoso, apporti dal bacino scolante), parzialmente implementati solo di recente.

L'area lagunare presenta una superficie pari a 160 km², interamente classificata come area SIC e ZPS. Compresa tra i delta dei fiumi Isonzo a Tagliamento è delimitata verso mare da una serie di isole barriera, interrotte da sei bocche tidali, sbocco a mare di altrettanti bacini: Lignano, S. Andrea, Buso, Morgo, Grado e Primero (Fig. 2.1).

La vivace dinamica longshore unitamente ad alcuni importanti interventi di armatura delle bocche tidali (tra il 1928 e il 1934 per la bocca di Grado e 1964-1969 per quella di Porto Buso) hanno avuto come conseguenza la formazione verso mare di una serie data di banchi sabbiosi di poco emergenti, che si estendono per una lunghezza complessiva di 10km dalla bocca di Buso a quella di Grado. Caratterizzati da grande dinamicità essi racchiudono piccolo bacini paralagunari con un'estensione complessiva pari a 6 km² (Brambati et al., 1998).

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 recentissima *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: Lignano (5050ha), S. Andrea (700ha), Buso (4500ha), Morgo (297ha), Grado (3314ha), Primero (1900ha). Un modello numerico dell'idrodinamica lagunare è stato recentemente sviluppato da Ferrarin et al. (2010), ma è antecedente all'aggiornamento dei dati batimetrici.

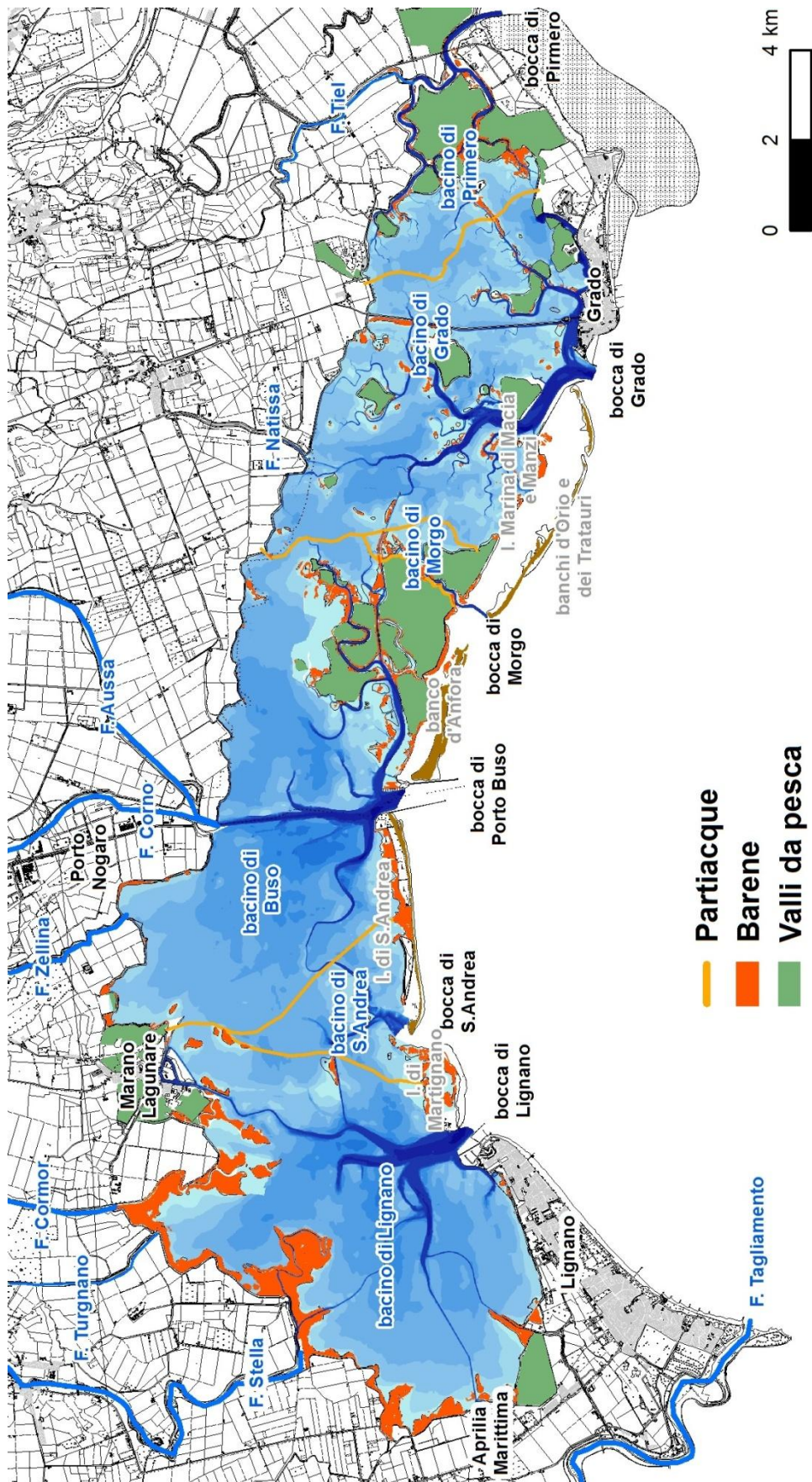


Figura 2.1 - Inquadramento geografico della laguna di Marano e Grado.

Le maree sono semi-diurne con un'ampiezza media di 0.65m, 1.05m in sizigia e 0.22m in quadratura, (Dorigo, 1965). I dati sulla propagazione della marea all'interno del bacino lagunare sono scarsi e datati. Ferla et al. (2008) hanno recentemente confermato i dati di Dorigo (1965), che mostravano una buona efficienza idraulica in laguna, dovuta ai bassi tempi di propagazione dalle bocche al margine lagunare, con un'ampiezza preservata o in alcuni casi aumentata.

Il tasso di innalzamento del livello del mare che si ottiene dal dataset del mareografo di Trieste è pari a +1.35 mm/anno per l'intero intervallo temporale tra 1890 e 2010. Considerando gli intervalli di tempo presi in considerazione in questo studio (1954 - 1990, 1990 - 2006) si ottengono tassi d'innalzamento pari a +0.63 mm/anno per l'intervallo 1954–1990 e +5.27 mm/anno per il 1990–2006.

I dati disponibili per la valutazione dei tassi di subsidenza sono pochi e sono riferiti a caposaldi 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 (Antonioli 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).

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 m³/s, con il maggior contributo dato dallo Stella (36.1 m³/s) e dal Cormor (10.7 m³/s). Relativamente al trasporto solido, i dati sono di fatto inesistenti.

In termini di frequenza e intensità sono prevalenti i venti del primo quadrante, soprattutto da ENE (Bora) (Carrera et al., 1995). I venti da sud est (Scirocco) influiscono in modo minore sul bacino a causa dello scarso fetch disponibile in laguna.

La complessa interazione uomo-ambiente ha portato 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.

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 (65km) 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 1796ha, in prevalenza nei bacini di Grado, Morgo e Primero.

2.2 Origine, evoluzione e geomorfologia

Dal punto di vista geografico, pur formando un complesso unico, la laguna è suddivisa in due diverse zone: la laguna di Marano (9000 ha) ad ovest e la laguna di Grado (7000 ha) ad est. Le due aree 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.

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 a 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 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.

Secondo una suddivisione “classica” (Brambati, 1969) all'interno del bacino lagunare possono essere distinte diverse zone morfologiche, in relazione alla loro posizione rispetto al livello delle maree:

- aree poste al di sopra del livello medio delle alte maree comprendenti le isole barriera e i banchi sabbiosi di recente formazione, la costa interna, le isole e le barene;
- aree intertidali, rappresentate prevalentemente dalle velme;
- aree poste al di sotto del livello medio delle basse maree, come le bocche, i canali lagunari e le paludi.

Per quel che riguarda la prima categoria le isole barriera che limitano la laguna verso mare sono da est verso ovest: Grado, Marina di Macia, Marina dei Manzi, Buso, S. Andrea, Martignano, a cui va aggiunta all'estremità occidentale la penisola di Lignano che costituisce il protendimento verso est della foce del fiume Tagliamento. Solo S. Andrea e Martignano possono essere ritenute tuttora vere e proprie isole barriera, negli altri casi la successiva formazione verso mare del sistema di banchi le ha totalmente escluse dalla dinamica costiera rendendole di fatto delle morfologie fossili. Come vedremo meglio in seguito sono il luogo che ha subito le maggiori modificazioni in seguito agli interventi antropici.

I banchi sabbiosi recenti esterni si sono formati sotto l'impulso della costruzione delle armature della bocca di Grado e di quella di Porto Buso, che favorendo l'intercettazione del carico solido longshore ha favorito la formazione di una serie di cordoni litoranei distaccati, la cui evoluzione è stata in parte analizzata e descritta da Brambati et al. (1998) per il periodo 1882-1990 e da Fontolan et al. (2007a) per un'analisi del rischio da mareggiata. Essi attualmente presentano quasi sempre quote poco elevate, solo in pochi casi ospitano sistemi di dune comunque poco sviluppati e sono soggetti a un'evoluzione piuttosto rapida.

Le isole sono presenti esclusivamente nella laguna di Grado, secondo Gatto & Marocco (1992) sono morfologie ereditate dalla antica piana alluvionale, hanno quota più elevata delle barene, comprendono sabbie a volte cementate o livelli di ghiaia ascrivibili alla loro origine fluviale. Oggi sono spesso caratterizzate da vegetazione arborea, da aree coltivate o da insediamenti umani e vi sono stati frequentemente rilevati reperti archeologici di età romana e paleocristiana.

Le barene (Fig. 2.2) sono state descritte finora da Brambati (1969, 1970) e da Gatto & Marocco (1992); questi ultimi nella loro carta geomorfologica della laguna di Grado ne riportano un'utile cartografia con una prima proposta di classificazione. Inoltre una prima descrizione dell'evoluzione delle barene nel periodo 1954-1990 è stata realizzata da Fachin (2008) i cui dati, sono stati qui ripresi, corretti e aggiornati.



Figura 2.2 - Esempio di barene in laguna di Grado con la tipica vegetazione a limonium.

Spostandosi al di sotto del livello medio di marea, si individua un'altra morfologia lagunare: le piane di marea o, con toponimo locale, le *velme* le quali emergono periodicamente solo durante le fasi di bassa marea di sizigie.

I canali principali hanno un percorso meandreggiante e il loro livello di base coincide con quello medio di bassa marea (Brambati, 1969). I canali secondari hanno una funzione drenante e disperdente delle acque all'interno del bacino lagunare; a questi possono affluire altri canali più modesti di terz'ordine, detti anche *ghebi*, che stretti e tortuosi muoiono nelle piane di marea e nelle zone più interne. Con il termine locale *palude* infine vengono spesso indicati i fondali lagunari che rimangono sommersi anche durante le basse maree sizigiali (piane subtidali).

Le sei bocche tidali che collegano attualmente la laguna con il mare sono state descritte dal punto di vista idrodinamico da Dorigo (1965) e più recentemente da Brambati (1996). Relativamente all'assetto morfodinamico Fontolan et al. (2007b) ne hanno analizzato lo sviluppo delle strutture di *ebb-delta* e la relazione tra prisma di marea e volume dell'*ebb-delta*.

2.3 Distribuzione dei sedimenti

Dal punto di vista dell'origine dei sedimenti la laguna di Marano e Grado viene attribuita all'area petrografica Veneta (carbonatica) che, distinguendosi da quella Padana (sub-carbonatica), dipende dagli apporti terrigeni dei fiumi tributari dell'Adriatico settentrionale a Est di Venezia (Piave, Tagliamento, Isonzo, Rosandra) (Brambati & Venzo, 1967).

Nell'ambito della provincia veneta sono state distinte altre due sub-province, alle quali sono attribuibili anche i sedimenti presenti nell'area lagunare: magnesiaca a ovest del meridiano di Lignano dipendente dagli apporti terrigeni del fiume Piave e Tagliamento e calcitica, a est del meridiano di Lignano, dipendente dagli apporti terrigeni del fiume Isonzo (Brambati, 1969, 1970).

L'evoluzione sedimentologica di queste aree si è però attuata attraverso le continue modificazioni che hanno caratterizzato il reticolo idrografico superficiale regionale, prime fra tutte la già citata migrazione verso est della foce dell'Isonzo (Desio, 1922) e le divagazioni della foce del Tagliamento (Brambati & Venzo, 1967). Inoltre si ritiene che il fiume Natisone, ora affluente del torrente Torre, sfociasse con tutta probabilità direttamente in mare fra Grado e Morgo (Comel, 1954), mentre il fiume Stella scorre ora in un vecchio alveo abbandonato dal fiume Tagliamento (Dorigo, 1965).

La prima descrizione delle principali modalità di trasporto e quindi dell'origine dei sedimenti del sistema laguna e isole barriera attuali si deve a (Brambati, 1969; 1970) secondo il quale l'origine dei sedimenti dell'area lagunare va attribuita ai fiumi Isonzo e Tagliamento, i cui sedimenti derivano a loro volta dallo smantellamento delle rocce affioranti nei rispettivi bacini idrografici, prevalentemente carbonatiti mesozoiche.

Per analizzare la distribuzione e il trasporto dei sedimenti nell'area lagunare bisogna tener conto dei processi descritti di seguito.

Processi costieri

Il trasporto *longshore* diretto prevalentemente da est verso ovest è responsabile della dispersione delle sabbie dalla foce dell'Isonzo fino a Lignano e del loro accumulo nelle formazioni di spiaggia delle attuali isole barriera (Brambati, 1970). Qui eventi di *washover* possono periodicamente determinare azioni di trasporto di sedimenti sabbiosi nelle aree lagunari retrostanti. L'apporto di sedimenti sabbiosi tilaventini appare invece attualmente trascurabile (Brambati, 1970) e la loro presenza in laguna rimane confinata a ovest della direttrice che congiunge la bocca di Lignano a Marano Lagunare, dove sarebbe in gran parte attribuibile a un'antica posizione di foce corrispondente all'attuale foce dello Stella.

Interazione tra marea e trasporto longshore

Da questo processo si origina la formazione di *ebb-delta* presso le bocche tidali con accumulo di sabbie (Fontolan et al., 2007b).

Trasporto a opera delle correnti di marea attraverso le bocche lagunari

Il trasporto avviene per trazione al fondo di sabbie che si trovano presenti nei canali principali nelle aree più prossime alle bocche; all'interno della laguna possono entrare per sospensione i sedimenti più fini (fanghi e sabbie fini) di origine fluviale trasportati dalle correnti lungo riva e poi presi i carico dalla marea entrante. Secondo Brambati (1969, 1970) in laguna afferiscono prevalentemente sedimenti fini provenienti dal Tagliamento, mentre i fanghi isotini vengono dispersi al largo. Questa affermazione è stata però in larga parte confutata grazie a successive analisi legate alla mineralogia (Brambati, 1972) e alla distribuzione del mercurio di origine isotina nei sedimenti dei fondali lagunari (Brambati, 1996; Acquavita et al., 2012). Esso infatti è presente nelle maggiori concentrazioni soprattutto nella frazione siltosa, con un evidente gradiente decrescente da est verso ovest, identificando chiaramente l'origine isotina dei sedimenti fini attualmente presenti nei bacini più orientali della laguna. Anche lo studio di un evento di piena dell'Isonzo effettuato da Covelli et al. (2006) ha permesso di verificare, presso la bocca di Primero, il trasporto di sedimento fine ricco in mercurio verso l'interno della laguna. Per quel che riguarda il bilancio tra quantità di sedimento in entrata e quello in uscita va citata una campagna di misure eseguita sulle bocche di Grado, Lignano e Buso durante l'anno 2010-2011 dal Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste in collaborazione con l'Autorità di bacino regionale, i cui risultati non sono però stati ancora elaborati in modo tale da renderli utilizzabili (a causa della dismissione dell'ente che ne era responsabile).

Trasporto in laguna da parte delle correnti di marea

All'interno della laguna il trasporto e il deposito dei sedimenti avverrebbe secondo (Brambati, 1969, 1970) secondo il principio dello *scour and lag effects* (van Straaten & Kuenen, 1958). Ne sarebbe diretta conseguenza la prevalenza presso le bocche di sabbie carbonatiche, sostituite lungo i canali e verso l'interno della laguna da peliti molto sabbiose e da peliti siltose. I sedimenti fini aumentano quindi progressivamente e percentualmente dalle bocche verso l'interno e verso i partiacque, dove rappresentano la quasi totalità dei sedimenti. Attraverso analisi specifiche sulla distribuzione granulometrica modale dei sedimenti, è stato possibile rilevare che nella laguna di Grado la sedimentazione pelitica è molto attiva, dove i sedimenti con percentuali di fine superiore all'80% sono presenti sul 75% della superficie totale, contrariamente alla laguna di Marano dove superano di poco il 45%. Ciò sarebbe attribuibile alla minor velocità di corrente presente nella laguna di Grado dove la circolazione delle acque è più limitata, con ristagni e ricambi d'acqua molto più lenti rispetto alla zona

di Marano (Brambati, 1969). Questo dato sembrerebbe confermato dalla distribuzione granulometrica riportata da Acquavita et al. (2012), dove appare ben evidente la zonazione dei fanghi (*mud*) all'interno del bacino lagunare (Fig. 2.3).

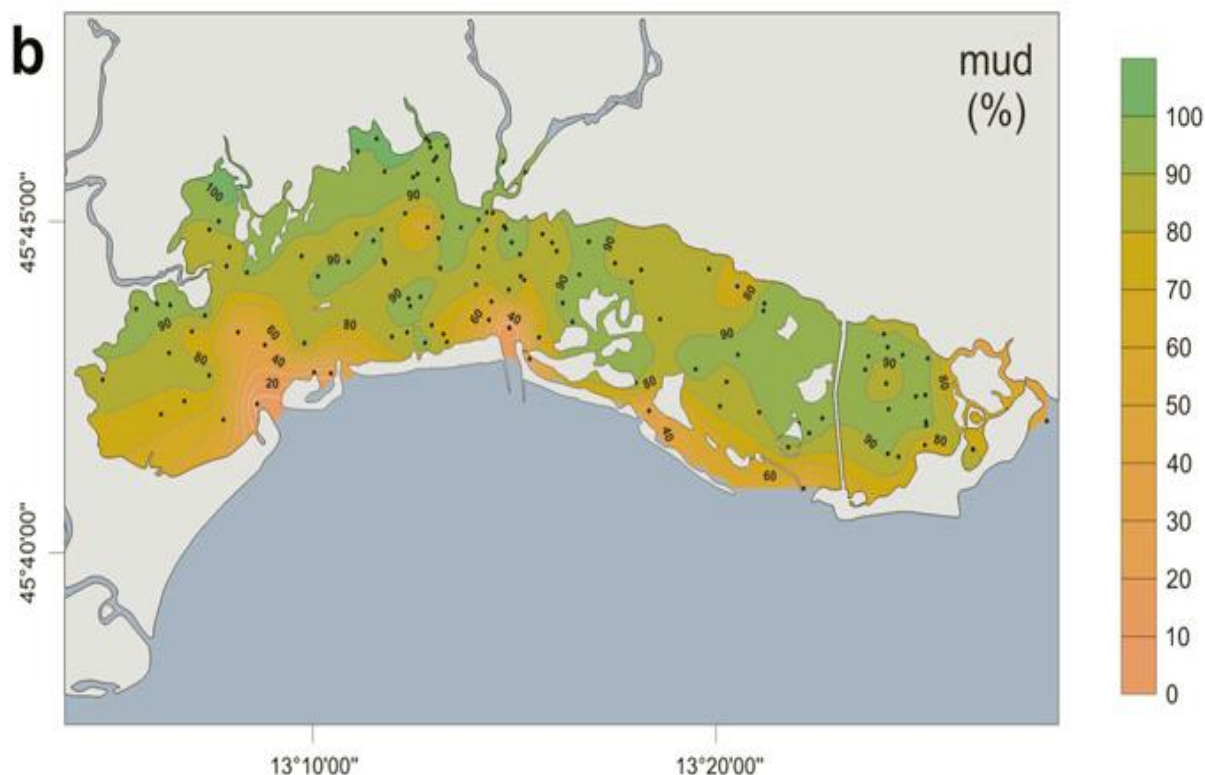


Figura 2.3 – Distribuzione della componente fine (<63 μm) nei sedimenti superficiali della laguna di Marano e Grado ricavate da varie fonti bibliografiche (Acquavita et al., 2012).

Apporti fluviali diretti in laguna

Giudicati spesso irrilevanti soprattutto perché i diretti immissari della laguna sono in prevalenza fiumi di risorgiva, sono allo stato attuale difficilmente quantificabili vista la quasi totale assenza di dati di misura del trasporto solido. Relativamente all'apporto solido del fiume Stella, il maggior immissario della laguna, in condizioni idrologiche normali sono stati misurati tenori di carico solido sospeso compresi tra 5 e 10 mg/dm^3 , che però aumentano a 10-30 mg/dm^3 in caso di prolungati periodi di pioggia nell'area di pianura e superano eccezionalmente concentrazioni di 60 mg/dm^3 (Belli et al., 1996).

Azione del moto ondoso da vento

Anche in questo caso i dati sono quasi del tutto assenti per una componente che induce erosione localizzata e risospensione dei sedimenti di fondo. Un modello degli effetti idrologici del vento di bora

sulle varie aree della laguna è stata effettuata da Ferrarin et al. (2010), ma si tratta di una tematica che richiederebbe ulteriori specifiche ricerche anche con raccolte di dati.

Risospensione indotta dalle pratiche di pesca

La pratica della semina e della raccolta delle vongole sui bassi fondali lagunari induce una risospensione dei sedimenti fini che, visti gli elevanti tempi di sedimentazione che li caratterizzano, possono venir trasportati in altre aree della laguna o fuoriuscire dalle bocche. Questo fenomeno è stato studiato attraverso alcune procedure sperimentali da Burla & Fontolan (2003), ma è molto difficile da quantificare viste le conoscenze attuali e andrebbe sicuramente approfondito.

Visti i processi che interagiscono nell'ambiente lagunare, in estrema sintesi i sedimenti che costituiscono gli attuali fondali possono essere attribuiti a tre diverse origini Marocco (1995): apporti marino /costieri nell'area di pertinenza delle bocche; apporti continentali lungo il margine della laguna e apporti di origine mista ubicata nel settore centrale della laguna.

3 STUDIO IN AREE CAMPIONE: ASPETTI MORFOLOGICI, EVOLUTIVI E SEDIMENTOLOGICI

3.1 Scelta delle aree campione

Una prima parte del presente progetto di ricerca comprende un'attività di raccolta dati e successiva analisi ed elaborazione, eseguite in 13 aree campione distribuite all'interno della laguna di Marano e Grado (Fig. 3.1).

Le aree campione indicate sono state scelte a partire dall'individuazione delle aree a barena e dalla digitalizzazione dei relativi bordi, realizzata sulla base delle foto aeree del 2006 (come meglio dettagliato al par. 4.2), che ha permesso di avere una visione complessiva dell'estensione e della distribuzione delle barene nell'area lagunare, anche in relazione agli altri elementi geografici e morfologici.

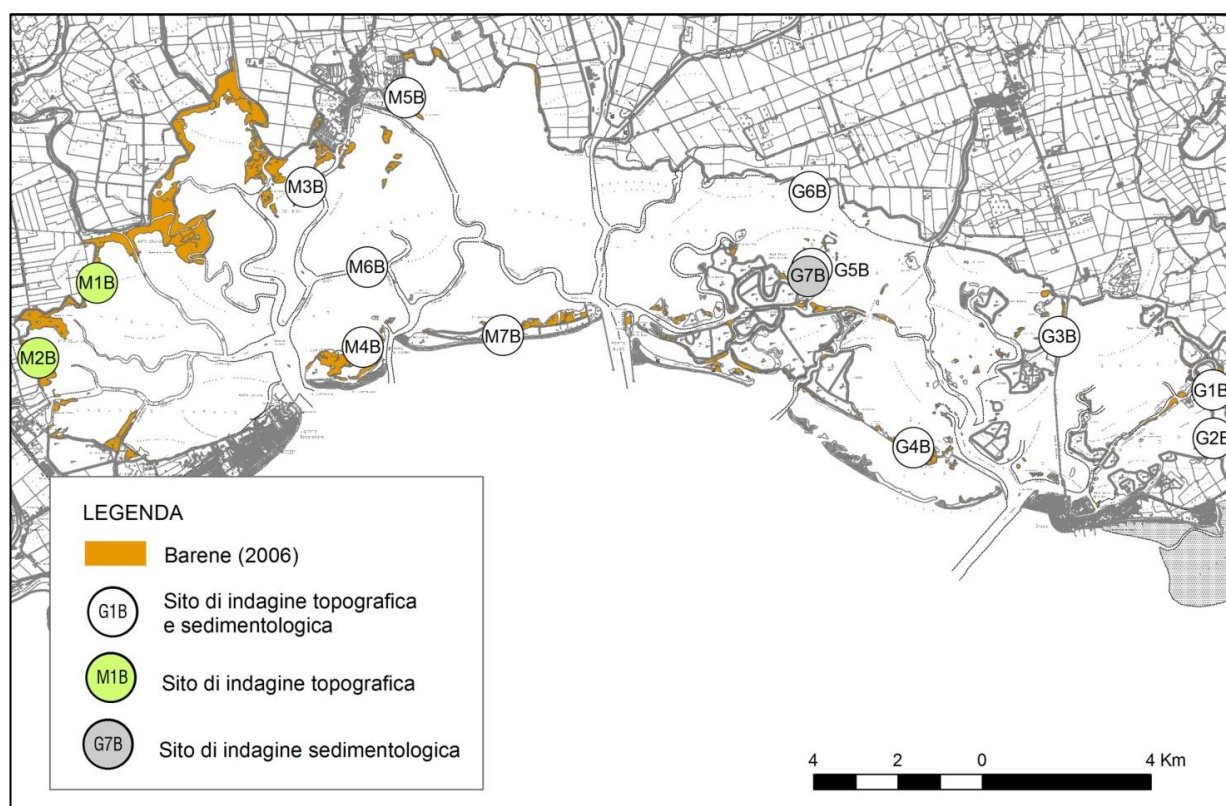


Figura 3.1 - Ubicazione delle aree campione.

Con lo scopo di descriverne gli aspetti morfologico / evolutivi e sedimentologici per ciascuna area campione è stata realizzata un'analisi specifica e una raccolta di dati sul campo, comprendenti:

- Analisi delle foto aeree disponibili, in particolare le annate 1954, 1990 e 2006 (per il dettaglio si veda il par.4.2) per il riconoscimento dei bordi delle barene e delle loro morfologie interne (ghebi e chiari);
- Rilievi topografici e morfologici di dettaglio lungo sezioni;
- Prelievo di carote di sedimento.

Ai differenti siti è stata attribuita una sigla la cui lettera iniziale è “M” per la laguna di Marano o “G” per la laguna di Grado, seguita da un numero progressivo e dalla lettera “B” (barena).

3.2 Materiali e metodi

3.2.1 Rilievo topografico

Poiché uno degli obiettivi della ricerca era la caratterizzazione morfologica delle barene è stata effettuata una serie di sopralluoghi ricognitivi e di campagne di rilievo topografico e morfologico, per rendere completa la descrizione delle 13 aree campione prescelte, alcune delle quali già rilevate nel corso del 2009 - 2010.

Per eseguire il rilievo topografico, che consta di transetti opportunamente tracciati in base alla morfologia della barena, è stata utilizzata una strumentazione diversa a seconda delle condizioni del luogo.

Stazione totale: la strumentazione utilizzata consta di una stazione totale con distanziometro digitale Zeiss modello Elta 3 e prisma montato su asta telescopica (Fig. 3.2). La stazione totale è stata posta sulla barena in un punto opportunamente scelto per garantire sufficienti condizioni di stabilità e visibilità. Da questo punto sono stati tracciati, come semplici differenze di angoli, punti noti quali elementi riconoscibili in carta, oppure (se posti a distanza inferiore ai 600m e raggiungibili a piedi o in barca) utilizzando il prisma. In ciascun caso è stato collimato un caposaldo di ubicazione e quota note, al quale riferire le differenze di quota registrate dallo strumento. Successivamente utilizzando il prisma montato su un'asta telescopica sono stati collimati una serie di punti lungo il profilo scelto a distanze variabili a seconda della morfologia più o meno accidentata.

Strumentazione GPS: è stato utilizzato un sistema GPS *Thales/Magellan Professional ProMark3*, differenziale a singola frequenza di tipo *post-processing*. Una stazione denominata “Base” è stata posizionata sul caposaldo (Fig. 3.3), mentre l'altro apparecchio, denominato “Rover”, è stato utilizzato per rilevare i punti del profilo oppure, in alcuni casi, per posizionare un punto stazione sulla barena stessa dal quale poi rilevare i punti del profilo col sistema stazione totale / prisma. I dati sono stati poi elaborati in post-processing con il software *GNSS Solutions*, appositamente creato dalla *Thales*

Navigation per gli apparecchi ProMark3. Inserendo i dati del caposaldo di riferimento e operando la correzione incrociata dei dati registrati dalla “Base” e dal “Rover”, è possibile ottenere un errore di posizione centimetrico, sia orizzontale che verticale.

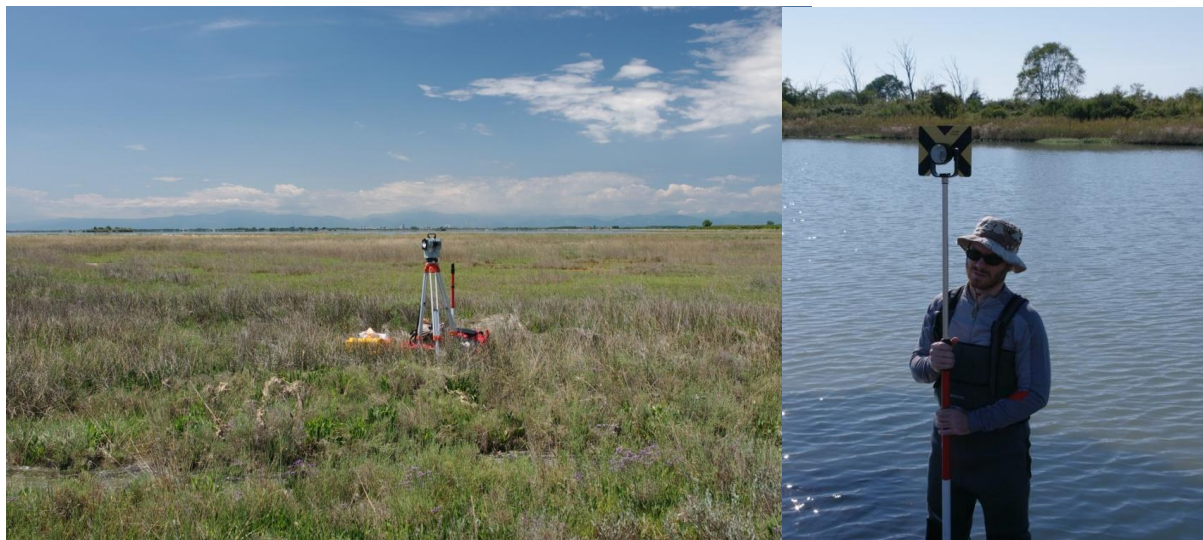


Figura 3.2 - Diverse fasi del rilievo con stazione totale: a sinistra stazione montata sul punto stazione, a destra rilievo dei punti del profilo con prisma montato su asta telescopica.

Le condizioni di rilievo delle barene sono state spesso difficili a causa degli scarsi battenti d’acqua nelle aree limitrofe che ne rendono difficile il raggiungimento con le imbarcazioni, del substrato eccessivamente cedevole, delle quote poco elevate rispetto al livello del mare e della scarsità di caposaldi di riferimento; per questo motivo i profili non sono sempre di estensione o ubicazione ottimale rispetto a quanto progettato in fase preliminare.

Per quel che riguarda le fasi di elaborazione, nel caso che il profilo sia stato eseguito con metodo GPS, successivamente alla correzione post-processing i punti rilevati sono stati esportati in formato ASCII come triplette di coordinate x, y, z nel sistema di coordinate UTM WGS84 fuso 33 chilometrico. Dopo essere stati convertiti nel sistema nazionale Gauss Boaga fuso Est attraverso il software CartLab 2, sono stati importati in ESRI ArcGis 10 dove sono stati trasformati in shapefile. Il profilo è poi stato esportato in Excel per la rappresentazione in sezione.

Per i profili eseguiti con la stazione totale, i punti rilevati sono stati trascritti su un foglio elettronico Excel dove sono state calcolate le distanze parziali da punto a punto e la quota sul l.m.m., ricavata per differenza rispetto a quella del caposaldo di riferimento. Successivamente la posizione del punto stazione è stata ricostruita in Autocad Map grazie alla collimazione di punti noti eseguita in campagna ed è stato così creato un sistema di coordinate fittizio incentrato sul punto stazione, nel quale proiettare tutti i punti collimati. Dopo essere stati riportati nel sistema nazionale Gauss Boaga Fuso Est i punti sono stati importati in ESRI ArcGis 10 dove sono stati trasformati in shapefile.

Per l'aggancio di quote e posizione è stata utilizzata la rete di caposaldi presente sull'argine di conterminazione, sulle isole e all'interno del bacino lagunare, rilevata nel 2005 dal Prof. Marchesini dell'Università di Udine (Protezione Civile & Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005).

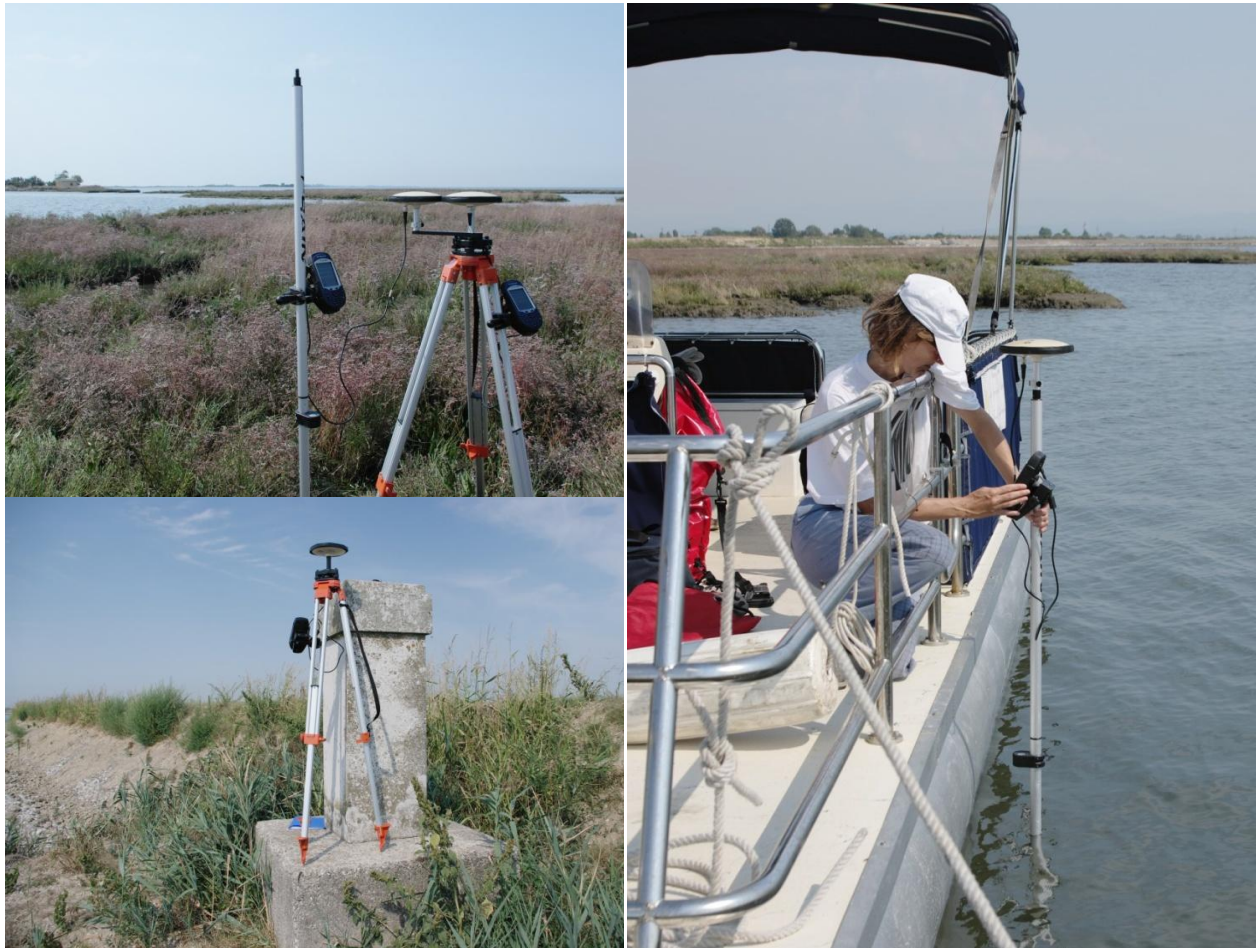


Figura 3.3 - Diverse fasi del lavoro di rilievo effettuato con la strumentazione GPS.

Nella tabella seguente (Tab. 3.1) sono riportate le date in cui è stato eseguito il rilievo topografico e la strumentazione utilizzata. Per l'ubicazione delle aree campione si veda la figura 3.1.

Sigla	Luogo	Data	Strumentazione utilizzata
G1B	Barbana	09-giu-10	Stazione totale + GPS
G2B	Sinuta	10-giu-10	Stazione totale
G3B	Canale Belvedere	14-giu-12	Stazione totale
G4B	Marina dei Manzi	12-lug-12	Stazione totale
G5B	Gran Chiusa	26-giu-12	Stazione totale
G6B	Mandragole	11-set-12	GPS
M1B	Valle Hierscel	19-nov-09	Stazione totale
M2B	Idrovora Lame	05-nov-09	Stazione totale
M3B	Canale di Marano	14-ott-10	Stazione totale
M4B	Bocca S. Andrea	30-sett-10	Stazione totale
M5B	Marano	17-ott-11	Stazione totale + GPS
M6B	Allacciante S. Andrea	23-ago-12	Stazione totale
M7B	Isola di S. Andrea	10-lug-12	Stazione totale

Tabella 3.1 - Elenco dei rilievi topografici eseguiti tra il 2009 e il 2012 e strumentazione utilizzata.

3.2.2 Sedimenti

Il campionamento dei sedimenti è stato eseguito in 11 delle aree campione prescelte; un ulteriore sito è stato campionato pur in mancanza del rilievo topografico (sito G7B adiacente a G5B). Per ogni singola area campione sono state prelevate, attraverso l'utilizzo di una sgorbia a mano, due carote di sedimento in aree adiacenti (a distanze comprese tra 5 e 40m sempre caratterizzate da copertura vegetale con specie ascrivibili all'ambiente di barena) aventi lunghezza massima pari a 50cm, a una quota campagna compresa tra 0.10 e 0.50m sul l.m.m. (Fig. 3.4).

Una volta prelevate le carote sono state trasportate in laboratorio e conservate in camera fredda. Successivamente sono state sezionate longitudinalmente per ottenere due emicilindri specularmente uguali che sono stati fotografati in luce artificiale. Dei due uno è stato descritto e subcampionato, l'altro è stato sigillato e riposto integro in camera fredda. La descrizione macroscopica delle carote è stata eseguita evidenziando le caratteristiche del sedimento: il colore (valutato mediante confronto con le tavole dei colori *Munsell Soil Color Charts* edizione 2000), il grado di omogeneità, l'idratazione, la tessitura, le strutture sedimentarie, l'eventuale presenza di bioturbazioni, la presenza di forme biologiche integre e bioclasti, l'accumulo di sostanza organica e resti vegetali, la presenza di chiazze rossastre dovute a processi di ossidazione.



Figura 3.4 - Operazioni di campionamento con la sgorbia.

Il subcampionamento delle carote è avvenuto tramite il prelievo di 76 campioni di sedimento dello spessore di 1cm. I sub-campioni sono stati prelevati in corrispondenza dei diversi tipi di facies individuate, entro intervalli in cui si è osservata una certa continuità litologica.

Le descrizioni macroscopiche riguardanti ogni singola carota, assieme a foto, rappresentazione grafica del log e localizzazione dei subcampioni sono state riportate in schede tecniche, di cui un esempio viene riportato in figura 3.5.

Ogni sub-campione è stato trattato con una soluzione di perossido di idrogeno (H_2O_2 , 3%) e acqua distillata in proporzione 1:4, per 48 ore a temperatura ambiente. Successivamente, ciascun subcampione è stato setacciato a $1000\mu m$. La frazione ottenuta ($<1000\mu m$) è stata messa in acqua distillata e quindi analizzata mediante granulometro laser *Malvern, Mastersizer 2000*. Si sono così ottenute le distribuzioni di frequenza con intervallo 0.5 phi, di cui sono stati calcolati i relativi parametri statistici secondo il metodo di Folk & Ward (1957): diametro medio (*mean size*), deviazione standard (*standard deviation*), simmetria (*skewness*) e appuntimento (*kurtosis*).

Molti dei campioni analizzati presentano un'elevata quantità di materiale vegetale sottoforma di frustoli o di materiale fibroso. Essi non vengono intaccati dal trattamento dei campioni con le quantità di

perossido di idrogeno utilizzate di norma e non possono essere eliminati mediante sifonamento perché tendono a sedimentare assieme alla frazione fine.

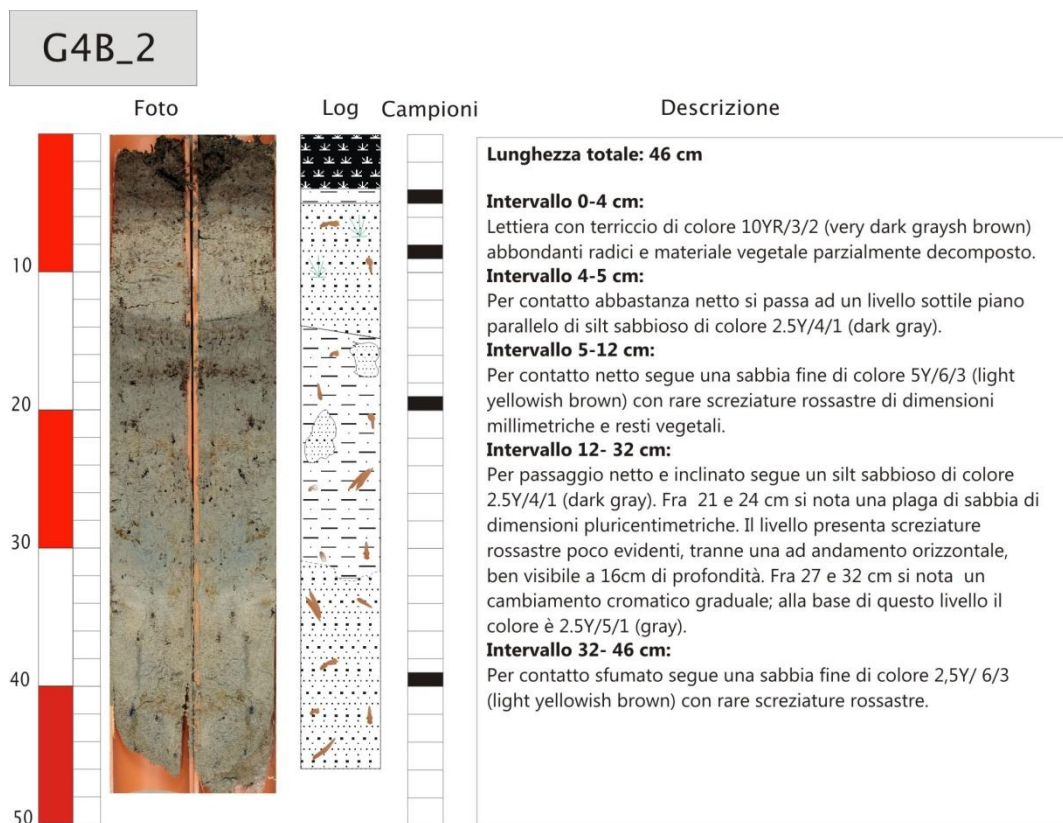


Figura 3.5 - Esempio di scheda tecnica realizzata per ogni carota di sedimento prelevata.

Una volta immessi nel granulometro per l'analisi essi vengono però individuati come granuli grossolani portando a una distorsione della curva con presenza di un picco anomalo che si colloca in genere tra i 3.5 e 1.5 ϕ , pur in assenza di sabbia. Si è provveduto pertanto a effettuare un test su un nuovo una serie di aliquote (6 campioni): i campioni sono stati setacciati a 62 μ m, verificando che la frazione sabbiosa fosse effettivamente trascurabile ed eliminando la parte vegetale per sifonamento dal trattenuto, per poi eseguire una nuova analisi granulometrica. Il confronto tra le due curve è mostrato in figura 3.6 dove è ben visibile la moda secondaria indotta dalla presenza del materiale vegetale. Una volta eseguito il confronto le curve che presentavano un problema simile sono state corrette.

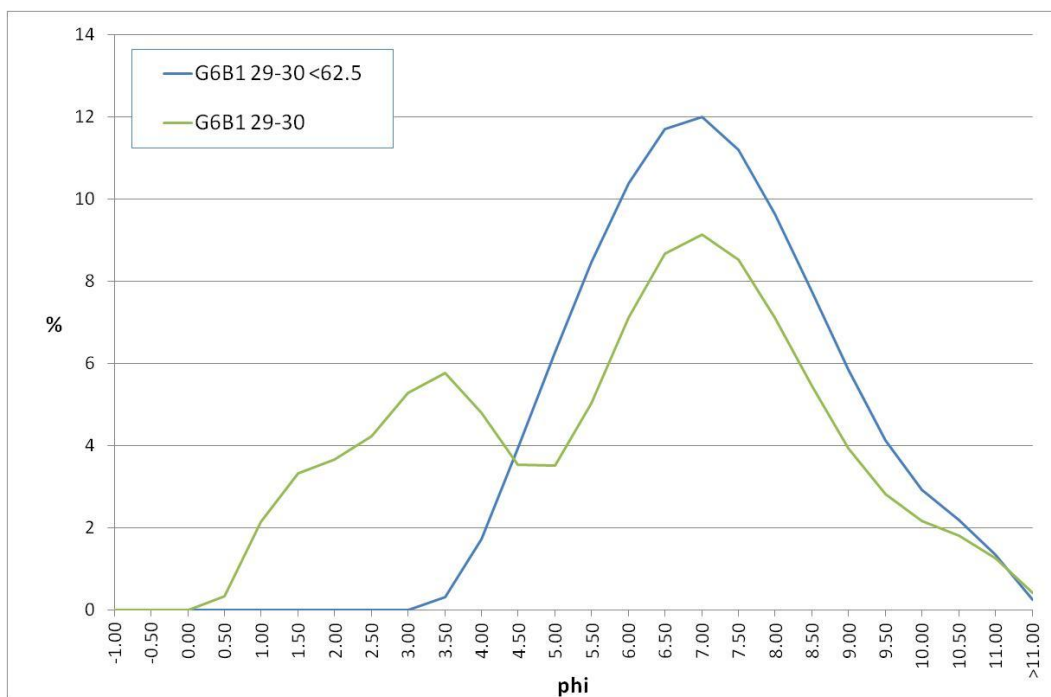


Figura 3.6 - Esempio di confronto tra curve di frequenza dello stesso campione. In verde è ben visibile la moda secondaria indotta dalla presenza del materiale vegetale, in blu lo stesso sedimento dopo l'eliminazione del materiale vegetale (si veda la spiegazione nel testo).

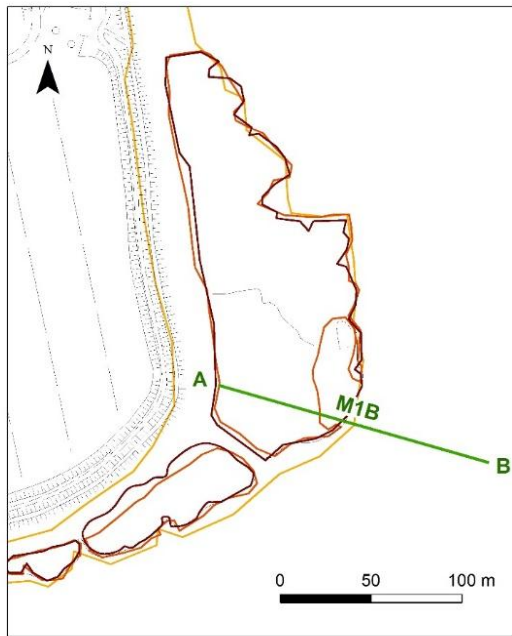
3.3 Morfologia ed evoluzione

3.3.1 Risultati

Vengono di seguito descritte le caratteristiche evolutive e morfologiche delle barene scelte come aree campione, desunte dalle informazioni ricavate dai rilievi topografici e morfologici eseguiti e dall'analisi delle foto aeree (cfr par. 4.2) degli anni 1954, 1990 e 2006.

Area campione M1B

La barena è situata sul margine occidentale del bacino di Lignano a ridosso dell'argine di conterminazione, dal quale è separata da un canale di origine artificiale (Fig. 3.7). Ampia nel complesso 1,6ha è suddivisa in tre porzioni separate da piccoli canali, una delle quali di dimensioni molto superiori (1,3ha) rispetto alle altre due. I margini lungo terra sono delimitati dal canale rettilineo che segue l'argine di conterminazione e si presentano continui e regolari; quelli invece verso la laguna hanno un andamento più naturale con promontori e alcune insenature pronunciate. Non si nota la presenza di ghebi. Il profilo topografico eseguito sulla porzione di barena più estesa (Fig. 3.8), ne descrive l'aspetto tabulare con quote piuttosto costanti che si attestano nell'intorno dei 0,50m sul l.m.m. Il margine rivolto alla laguna presenta un gradino molto pronunciato con un dislivello di circa 1m, che si raccorda



- Barene 2006
- Barene 1990
- Barene 1954

direttamente al fondale lagunare, qui costituito da una piana subtidale digradante dolcemente verso il centro del bacino. Nel periodo indagato la barena è stata soggetta a forti riduzioni di superficie, le più consistenti delle quali sono di origine antropica (escavo del canale sul margine occidentale), avvenuto tra il 1954 e il 1990. Nello stesso periodo si è verificato anche l'apparente allagamento di alcune insenature (che potrebbe anche in questo caso essere attribuibile all'azione antropica) e l'arretramento generalizzato dei margini. Nell'intervallo 1990-2006 i margini della barena sono rimasti invece essenzialmente inalterati, fatta eccezione del ricolmamento di una delle insenature citate in precedenza. Il margine rilevato topograficamente nel 2009 appare comunque arretrato rispetto a quello della foto aerea del 2006 di circa 0.7m.

Figura 3.7 – Rappresentazione in pianta della barena M1B e sua evoluzione nel tempo.

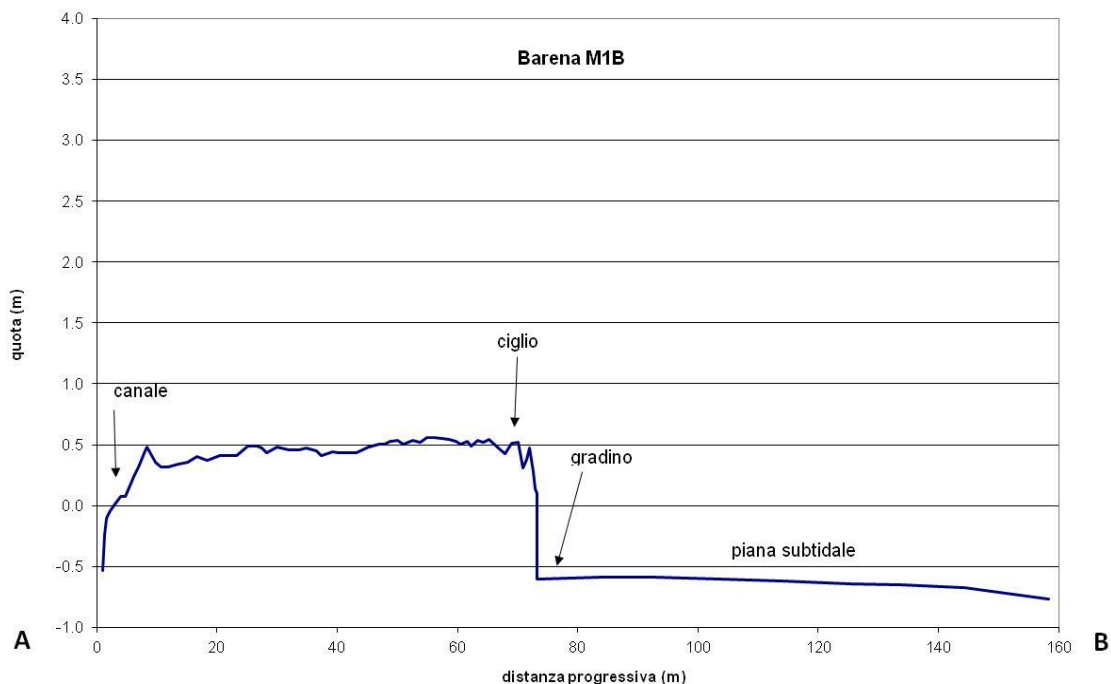
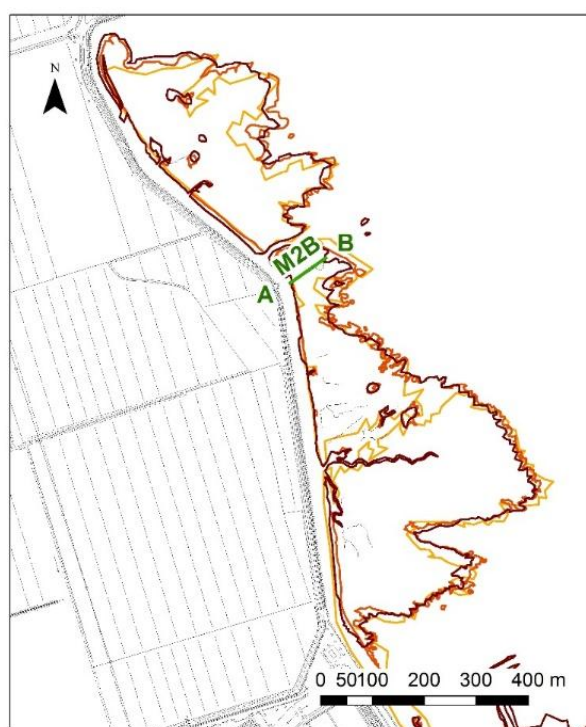


Figura 3.8 – Profilo topografico della barena M1B.

Area campione M2B

La barena si trova sul margine occidentale del bacino di Lignano a ridosso dell'argine di conterminazione ed è ampia nel complesso 25ha. È costituita da due parti principali separate da un piccolo canale (Fig. 3.9). I margini lungo terra, delimitati da un canale parallelo alla stessa, si mantengono continui e piuttosto regolari, mentre l'altra sponda dei canali è costituita dall'argine di conterminazione. Al contrario lungo il margine orientale, si osserva un andamento a baie e promontori, estremamente articolato e particolarmente accentuato nei tratti rivolti a nord-est. Localmente la barena è frammentata in piccoli isolotti. Sono presenti numerosi chiari e una rete di ghebi a struttura dendritica ben sviluppata, che drenano i flussi mareali verso il canale posto parallelamente all'argine di conterminazione. Sul lato laguna sono presenti alcuni rari ghebi molto più ridotti in lunghezza e dimensioni, che drenano verso la piana tidale.



□ Barene 2006
□ Barene 1990

Figura 3.9 – Rappresentazione in pianta della barena M2B e sua evoluzione nel tempo.

In base ai dati ricavati dal profilo topografico (Fig. 3.10), la barena presenta margini rialzati con quote in media di 0,5m sul l.m.m., mentre nella porzione centrale si presenta leggermente depressa con quote che si attestano sui 0,4m. Nella porzione centrale il profilo intercetta anche un chiaro e un piccolo ghebo. Il raccordo con i fondali lagunari, costituiti in quest'area da piane tidali (velme) si presenta graduale.

Questa barena mantiene in generale un bilancio positivo, anche in presenza di fenomeni erosivi localizzati ben evidenti. Nella prima fase evolutiva, tra il 1954 e il 1990, la sua superficie è infatti aumentata nel complesso (+2.09ha): osservando l'immagine si nota il riempimento delle insenature e il rinsaldamento delle varie porzioni della barena originaria. Successivamente, tra il 1990 e il 2006, si riscontra una situazione di sostanziale equilibrio (soli +0,03ha). Più che altro si tratta di una

ridistribuzione del sedimento, che viene eroso nei margini maggiormente esposti, risospeso e trasportato dalle correnti nelle baie, dove si deposita. Tutto il margine orientale (esposto all'ondazione da Bora) mostra infatti una chiara tendenza erosiva che si esplica con vistosi arretramenti soprattutto in corrispondenza dei promontori.

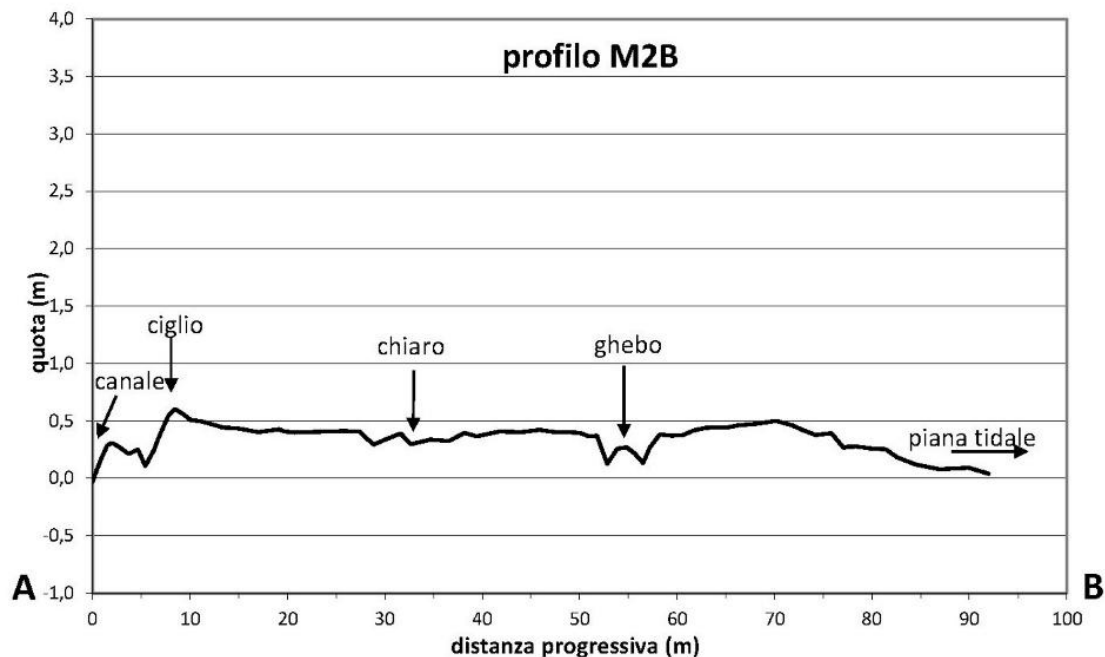
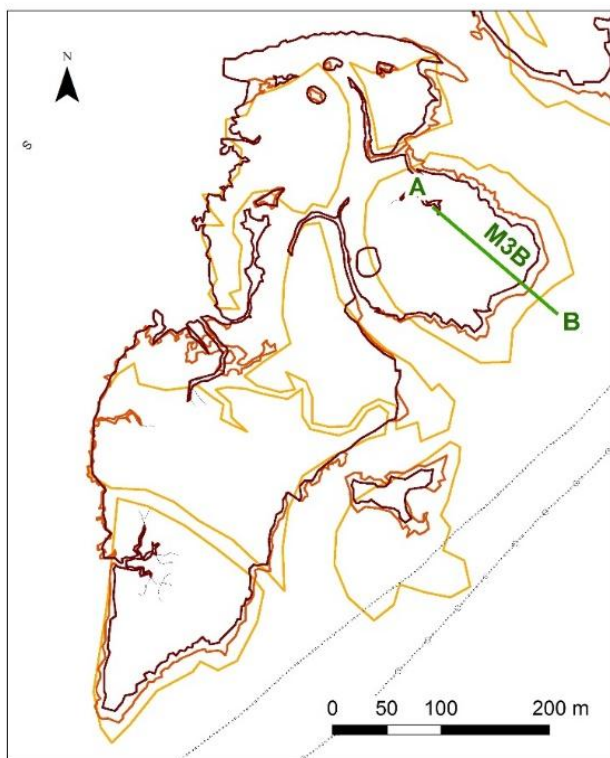


Figura 3.10 – Profilo topografico della barena M2B.



- Barene 2006
- Barene 1990
- Barene 1954

Figura 3.11 – Rappresentazione in pianta della barena M3B e sua evoluzione nel tempo.

Area campione M3B

Questa grande barena è localizzata sul lato occidentale del canale di Marano e presenta un'estensione complessiva pari a 11,3ha, con una struttura estremamente articolata (Fig. 3.11): è infatti costituita da un corpo principale di circa 11ha e uno secondario, molto più piccolo, nella parte orientale, dove è presente anche un casone. Il margine orientale è fortemente erosivo e presenta il tipico andamento a promontori e baie. Sul lato opposto il margine è molto articolato e presenta profonde insenature. Si possono osservare numerosi ghebi, che drenano sia verso est che verso ovest, e alcuni chiari.

Dal profilo topografico (Fig. 3.12) si osserva che la barena presenta quote più elevate (in media 0,5m sul l.m.m.) nella porzione più orientale, dove il margine presenta un doppio

gradino e un rialzo di accumulo. Man mano che si procede verso ovest le quote si riducono attestandosi in media sui 0,35m sul l.m.m., fino a incrociare la struttura meandriforme di un grande ghebo.

Nella prima fase evolutiva, tra il 1954 e il 1990, la barena è stata caratterizzata da un incremento poco rilevante della superficie (+0,6ha), che è però il risultato di evidenti variazioni planimetriche di segno opposto, quali il rinsaldamento dei numerosi corpi che formavano la barena originaria e una forte riduzione della superficie della barena orientale. In questa fase si osserva anche un arretramento generalizzato dei margini orientali. Durante la seconda fase evolutiva, tra il 1990 e il 2006, la barena assume un comportamento prevalentemente erosivo decisamente asimmetrico, anche se con un bilancio piuttosto contenuto (-0,7ha). Il margine orientale si erode e arretra più di quello occidentale, che localmente si espande, specie nella regione più settentrionale.

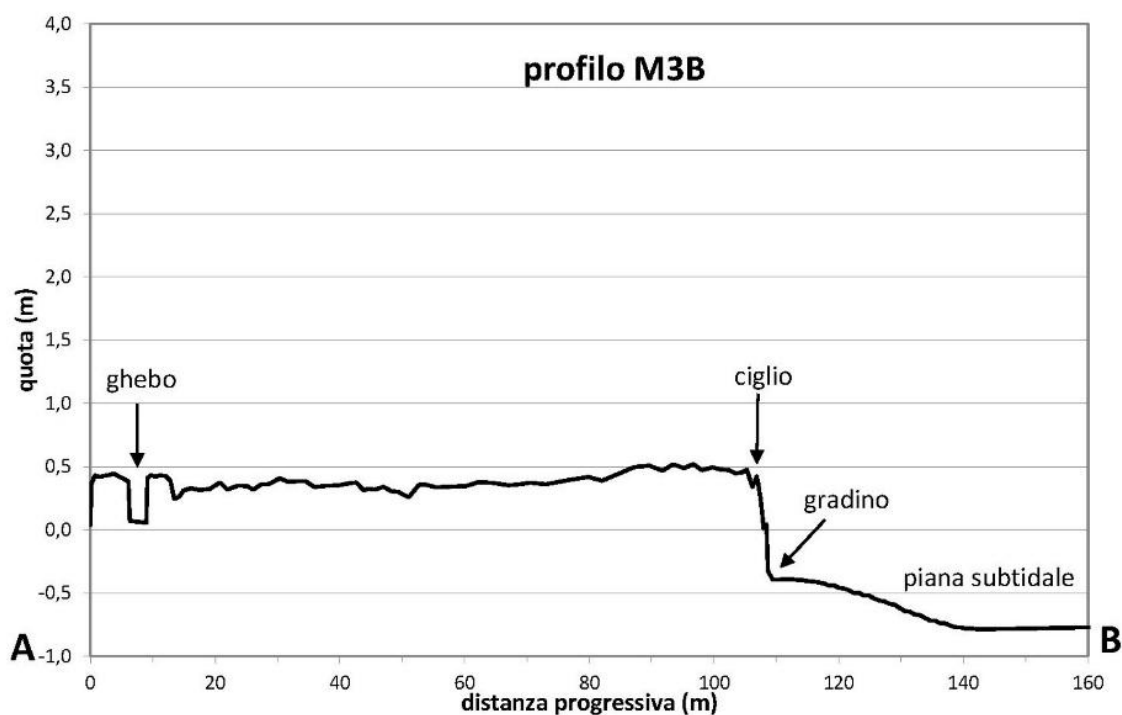


Figura 3.12 – Profilo topografico della barena M3B.

Area campione M4B

Collocata alle spalle dell'isola barriera di Martignano nei pressi della bocca tidale di S. Andrea, questa barena (Fig.3.13) fa parte di un articolato sistema di morfologie costituito da forme relitte di sistemi di spiaggia, washover e bocche tidali. Questo sistema oggi non è più attivo, in quanto escluso dai processi costieri in seguito all'espansione di nuovi banchi sabbiosi verso mare.

La barena oggetto del rilievo topografico (estesa 2.8ha) si allunga in direzione sud/est - nord/ovest ed è limitata da due canali secondari, di cui quello orientale è il più sviluppato e profondo. In foto aerea sulla porzione meridionale è ben visibile la presenza di una morfologia relitta di forma arcuata costituita da una dorsale sabbiosa, che risulta ben evidente anche dal profilo topografico (Fig. 3.14) e che raggiunge 1,18m sul l.m.m. Il margine settentrionale si raccorda con le velme della laguna e mostra un andamento piuttosto frastagliato, indice dei fenomeni di annegamento in atto.

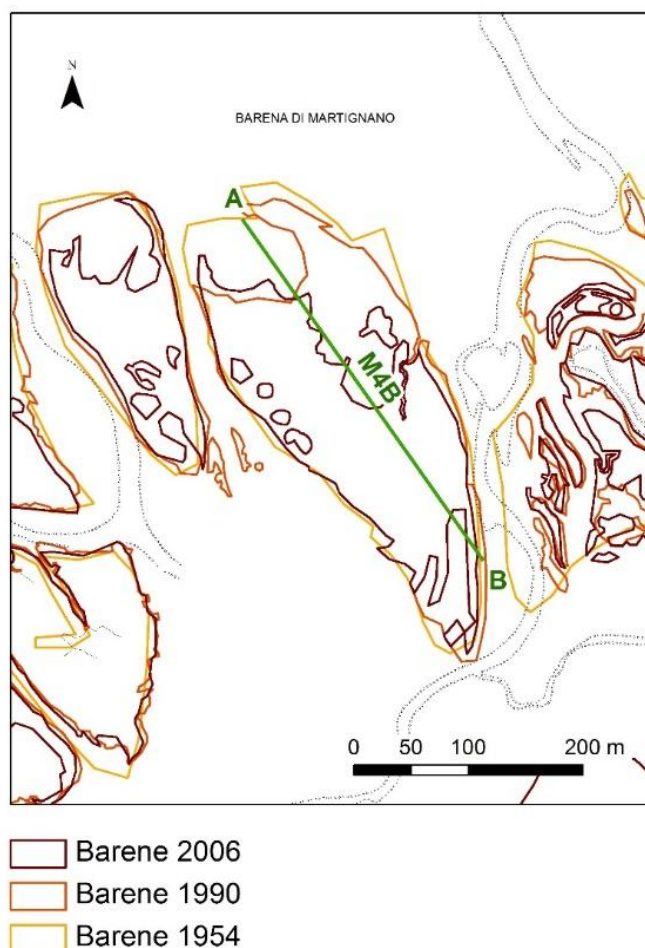


Figura 3.13 – Rappresentazione in pianta della barena M4B e sua evoluzione nel tempo.

Tutta la porzione centro / settentrionale della barena è rappresentata da un'ampia area (nella sezione corrisponde a un'ampiezza di circa 140m) con quote molto irregolari date dalla continua alternanza di aree emerse (con quote intorno ai 0,2- 0,4m) e di zone con quote molto prossime allo zero altimetrico, costituite da piccoli ghebi o da depressioni di forma irregolare, frequentemente allagate e prive di vegetazione (assimilabili quindi ai chiari). È qui presente una rete di ghebi dendritici e meandriiformi che si raccordano a un unico ghebo di dimensioni maggiori che defluisce nel canale secondario posto ad est.

Un'ulteriore area depressa ampia in sezione circa 108m, con quote medie di 0,10m è limitata verso la laguna dalla presenza di un margine rialzato che si raccorda gradualmente con le velme adiacenti.

Presso il margine occidentale sono visibili alcuni chiari dalla forma ben definita.

La tendenza evolutiva di questa barena è essenzialmente di tipo erosivo. Si rileva infatti un vistoso processo di annegamento che ha portato a una perdita di superficie nella porzione settentrionale sia nel periodo 1954-1990 (-0,9ha), che in maniera più accentuata (-1,5ha) nel 1990-2006. Nel periodo 1990-2006 l'annegamento ha interessato anche una vasta porzione della parte meridionale della barena, creando una stretta insenatura che si allunga da sud a nord, mentre i margini orientale e occidentale sono rimasti pressoché inalterati dal 1954 al 2006.

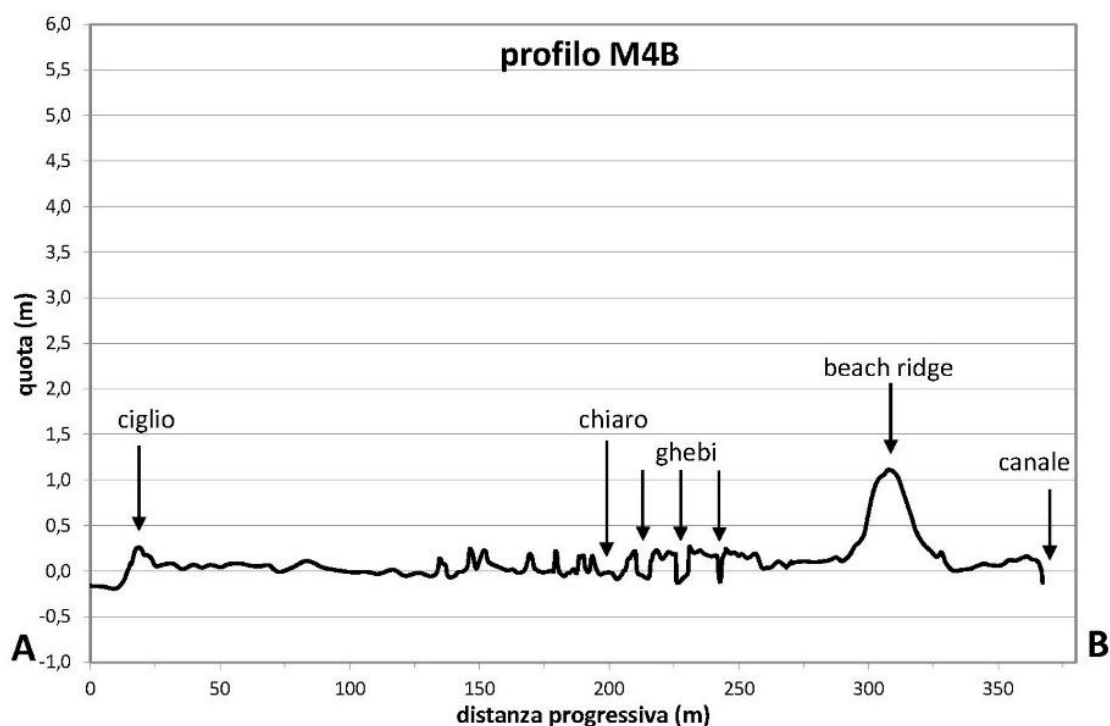


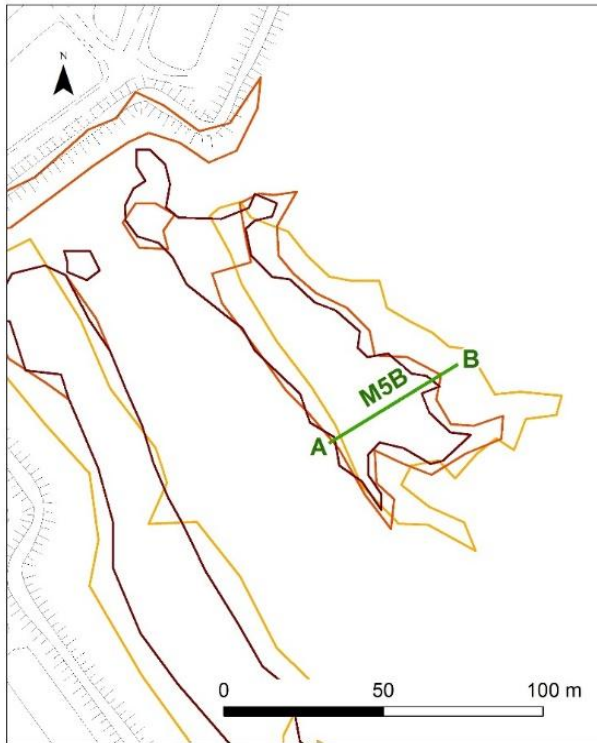
Figura 3.14 – Profilo topografico della barena M3B.

Area campione M5B

La barena ha un'area complessiva pari a 0,3ha, si trova a est dell'abitato di Marano Lagunare in vicinanza dell'argine di conterminazione (Fig. 3.15).

La morfologia del margine orientale mostra un andamento sinuoso a baie e promontori, tipico dei margini di barena esposti all'azione del moto ondoso. A occidente il margine presenta invece un andamento rettilineo, probabilmente imputabile all'escavo di un canale di accesso alla vicina valle da pesca, attualmente non più esistente.

Il transetto topografico eseguito nella porzione più meridionale della barena (Fig. 3.16), ne dettaglia la forma tabulare priva di morfologie evidenti con quote intorno ai 0,45m sul l.m.m.. Il margine di transizione verso la piana di marea sul lato orientale è caratterizzato da un gradino verticale di circa 20cm, posto in corrispondenza allo zero altimetrico e con un'evidente sovraescavazione. Lungo l'arco di tempo intercorso tra il 1954 e il 2006 si è manifestata una chiara erosione sul lato orientale, maggiormente esposto al vento di Bora, con arretramenti in media di 0,3m all'anno per il periodo 1954-1990 e di 0,2m all'anno per il periodo 1990-2006.



- Barene 2006
- Barene 1990
- Barene 1954

Nonostante la continua erosione del lato orientale, l'estensione totale della barena è rimasta pressoché costante: 0,39ha nel 1954, 0,29ha nel 1990 e 0,30ha nel 2006, grazie alla compensazione data da un fenomeno di accrescimento verso nord, in un'area più protetta dal moto ondoso.

Figura 3.15 – Rappresentazione in pianta della barena M5B e sua evoluzione nel tempo.

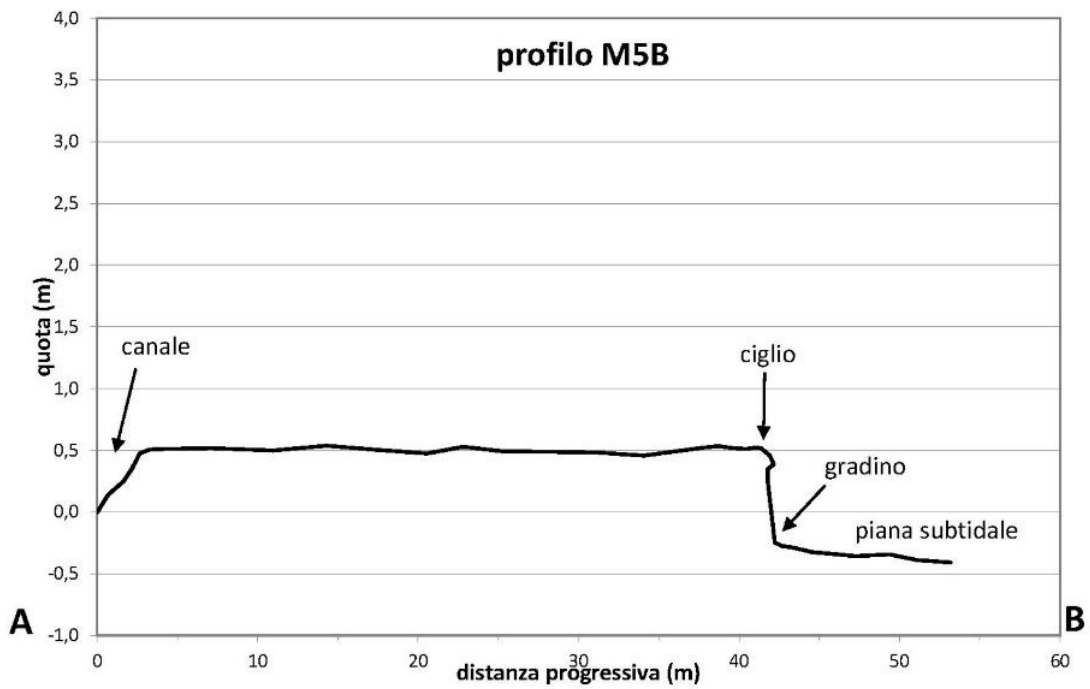


Figura 3.16 – Profilo topografico della barena M5B.

Area campione M6B

La barena, con un'estensione totale di 3,6ha, è costituita da un unico corpo allungato situato lungo la porzione di canale navigabile della Litoranea Veneta denominato Allacciante di S. Andrea, afferente al bacino di Lignano (Fig. 3.17). In pianta si osserva un perimetro continuo, con alcune insenature: l'ampiezza è diversa nelle varie parti in relazione ai diversi tassi di espansione della vegetazione e di accumulo sedimentario. Sul lato meridionale, lungo il canale, il margine ha un andamento nel complesso rettilineo, ma caratterizzato da una fitta alternanza di piccole baie e promontori legata

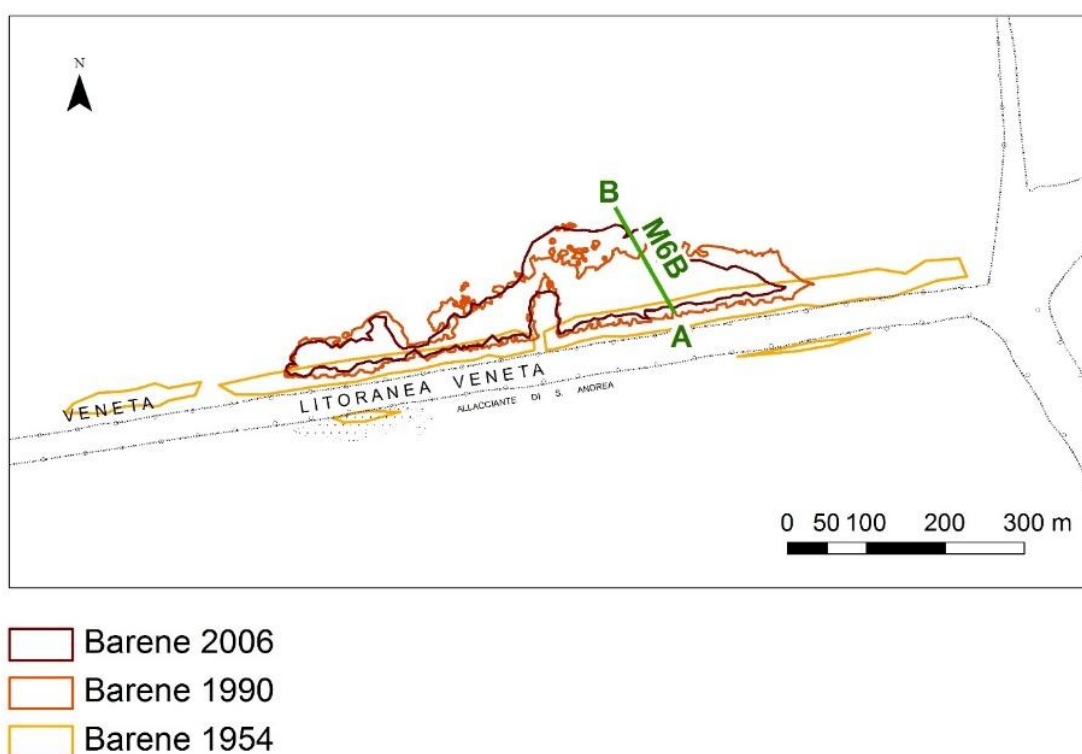


Figura 3.17 – Rappresentazione in pianta della barena M6B e sua evoluzione nel tempo.

all'azione erosiva dell'ondazione prodotta dal transito dei natanti lungo il canale. Essa è testimoniata anche dalla presenza di due evidenti gradini di erosione. Nella porzione centrale si osserva una profonda insenatura, probabilmente di origine antropica. Sul lato settentrionale il margine presenta in pianta un andamento più regolare e si raccorda in maniera graduale con la velma adiacente. Nella porzione centrale della barena sono presenti una serie di chiari di forma allungata abbastanza regolare.

Il transetto topografico (Fig. 3.18) mostra un gradino molto pronunciato con un dislivello di circa 0,40m sul lato canale e una porzione ampia circa 40m con quote molto elevate (in media oltre i 0,6m sul l.m.m.); segue una fascia caratterizzata dalla presenza di chiari e da ultimo un tratto con quote irregolari, ma comunque modeste (intorno ai 0,20m), limitato a nord da un breve rialzo che si raccorda gradualmente con la piana tidale.

L'origine di questa barena è molto probabilmente antropica, imputabile al periodo di escavo della litoranea veneta quando in seguito al dragaggio del canale il sedimento veniva scaricato sui bordi. Infatti nella foto aerea del 1954 la barena appare come una sottile striscia di sedimento emerso, senza apparenti morfologie naturali. Tra il 1954 e il 1990, il materiale scaricato a bordo canale è stato preso in carico e ridistribuito dall'azione del moto ondoso e delle correnti e la barena ha assunto una morfologia più naturale e maggiormente estesa (+1,49ha). Successivamente, nel periodo compreso tra il 1990 e il 2006, si osserva un bilancio complessivo erosivo (-0,47ha), risultante da contemporanei fenomeni di accumulo ed erosione. Di fatto attualmente il margine della barena evolve in modo asimmetrico, perdendo sedimento sul lato che si affaccia sul canale, che viene investito dal moto ondoso prodotto dai natanti in transito. Parte del materiale risospeso si deposita sul margine retrostante, più protetto. Un'ulteriore tendenza erosiva si verifica sul margine nord-orientale, esposto a bora.

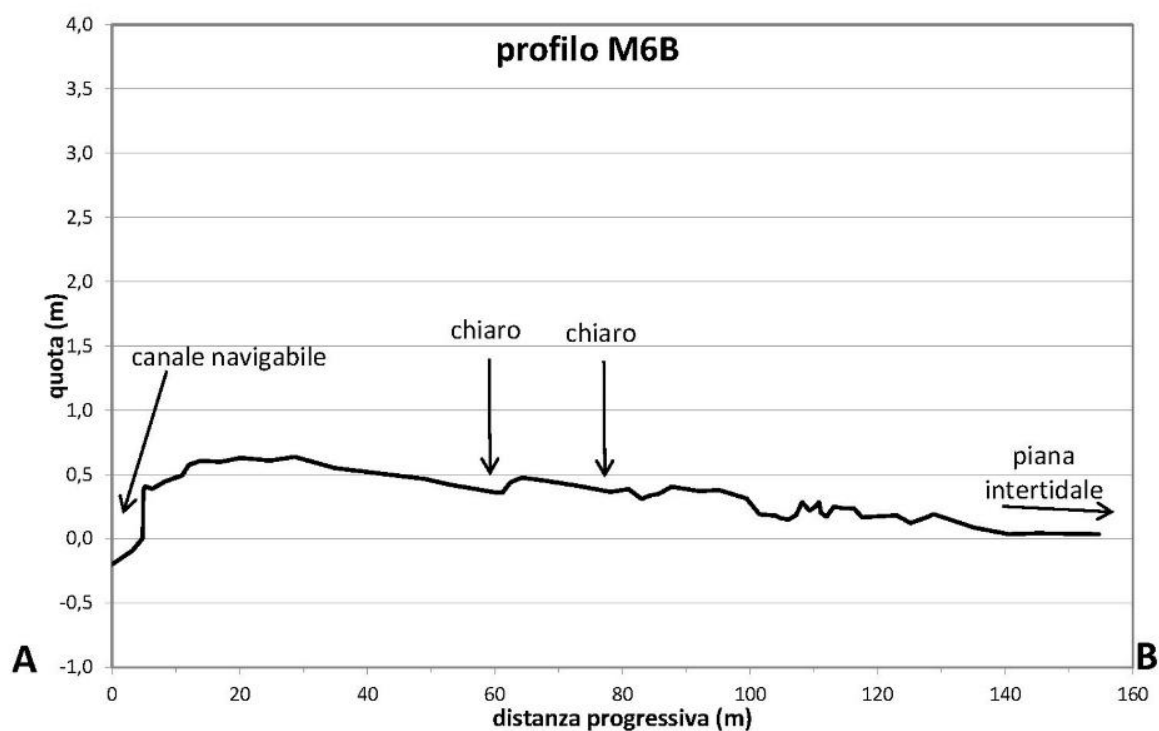


Figura 3.18 – Profilo topografico della barena M6B.

Area campione M7B

La porzione di barena presa in considerazione fa parte di un più esteso sistema di retrobarriera (13,6ha complessivi), sviluppatosi alle spalle dell'isola di S. Andrea (Fig. 3.19). L'area presenta numerosi chiari e ghebi molto meandreggianti e profondi e si raccorda sul lato verso mare a un argine in sabbia e alla spiaggia. Dal profilo topografico (Fig. 3.20), che si estende in direzione sud-nord, risulta evidente la

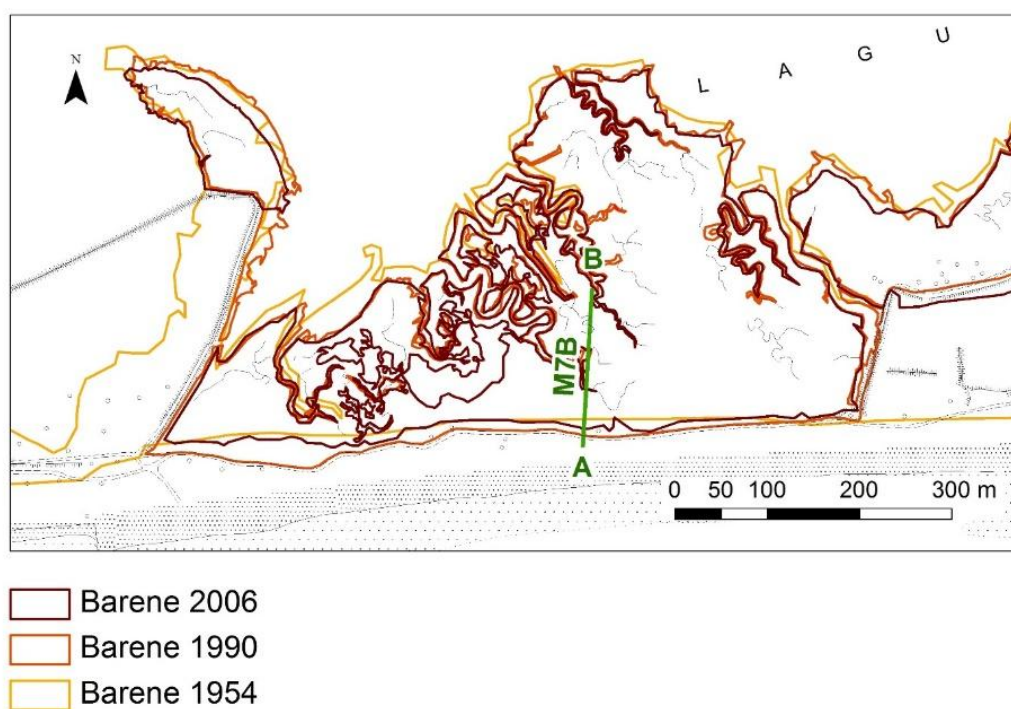


Figura 3.19 – Rappresentazione in pianta della barena M7B e sua evoluzione nel tempo.

struttura dell'argine artificiale che raggiunge la quota di 1,60m sul l.m.m.. La successiva vasta area a barena, ampia circa 120m, si attesta su quote piuttosto costanti (comprese tra 0,3m e 0,2m sul l.m.m.), anche se progressivamente digradanti verso i fondali lagunari a velme. Il profilo interseca più volte le anse dei ghebi, che presentano quasi sempre margini rialzati.

Questa barena mostra in generale un'erosione del margine sul lato lagunare evidente soprattutto durante il primo periodo (1954-1990), con arretramenti compresi tra 6 e 30m e in misura minore, nel secondo periodo (1990-2006), quando si manifesta anche un annegamento nelle porzioni centrali della barena, probabilmente imputabile a fenomeni di subsidenza/autocompattazione non sufficientemente compensati da apporti sedimentari.

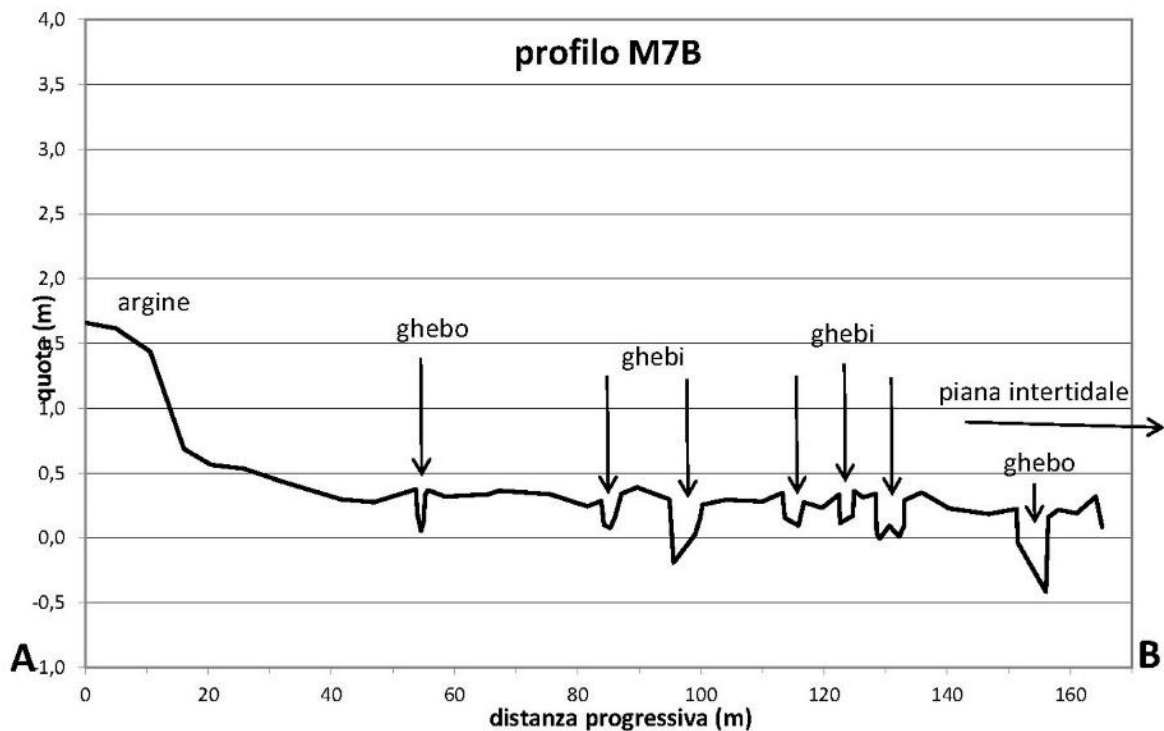


Figura 3.20 – Profilo topografico della barena M7B.

Area campione G1B

La zona presa in considerazione è composta da un gruppo di barene posizionate nel bacino di Primero, in un'area situata tra le valli da pesca Frate Zuane e Verzelai (Fig. 3.21). Esse si collocano in uno dei pochi tratti in cui i canali lagunari del bacino di Primero non sono confinati dalla presenza delle arginature delle valli da pesca. Qui il flusso mareale, libero di espandersi, ha dato origine nel tempo a strutture simili a sistemi deltizi con formazione di barene racchiuse da canali secondari. Le porzioni occidentali, rivolte verso il bacino di Grado sono di formazione più recente, presentano margini frastagliati e sono ricche di chiari, quelle invece più interne seguono l'andamento lineare dei canali e degli argini delle valli da pesca.

Il profilo topografico, effettuato per una lunghezza di circa 180m in direzione ovest-est (Fig. 3.22), individua nei primi 20m di transetto (a partire dall'estremità orientale) del corpo principale quote comprese tra 0,25m e 0,34m sul l.m.m.. Le quote decrescono poi nei successivi 25m fino a divenire di poco superiori al l.m.m., per tornare ad assestarsi intorno ai 0,30m fino all'estremità occidentale, dove è ben visibile l'intersezione con un canale secondario. Al di là del canale secondario è presente una piccola barena con quote che raggiungono i 0,40m, limitata a sua volta dal meandro di un altro canale.

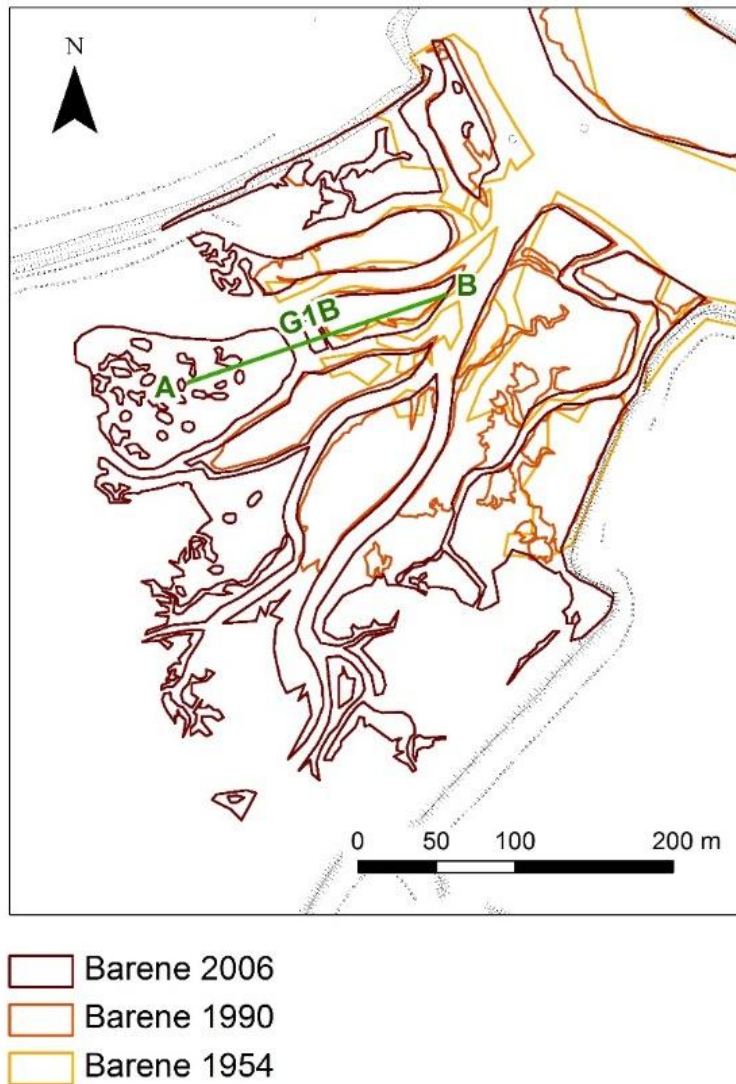


Figura 3.21 – Rappresentazione in pianta della barena G1B e sua evoluzione nel tempo.

Completa il profilo un corpo di barena di recente formazione con una lunghezza totale di circa 70m, che presenta una morfologia molto articolata: le quote sono piuttosto irregolari per la continua alternanza di piccoli chiari di forma tondeggianti e digradano progressivamente nella velma adiacente che, priva di vegetazione, mantiene però la stessa morfologia articolata.

Come già accennato il gruppo di barene mostra un trend decisamente positivo nel periodo 1954-2006, con la creazione di diversi ettari di nuova barena, nonostante una prima fase (1954 – 1990) di riduzione (da 0,24ha a 0,18ha) a carico soprattutto della porzione orientale. L'ultimo periodo di riferimento (1990-2006) vede un aumento di superficie per le barene già esistenti che raggiungono gli 0,22ha e nel contempo la formazione di nuove aree a barena verso ovest, portando così la superficie complessiva a un totale di 0,95ha.

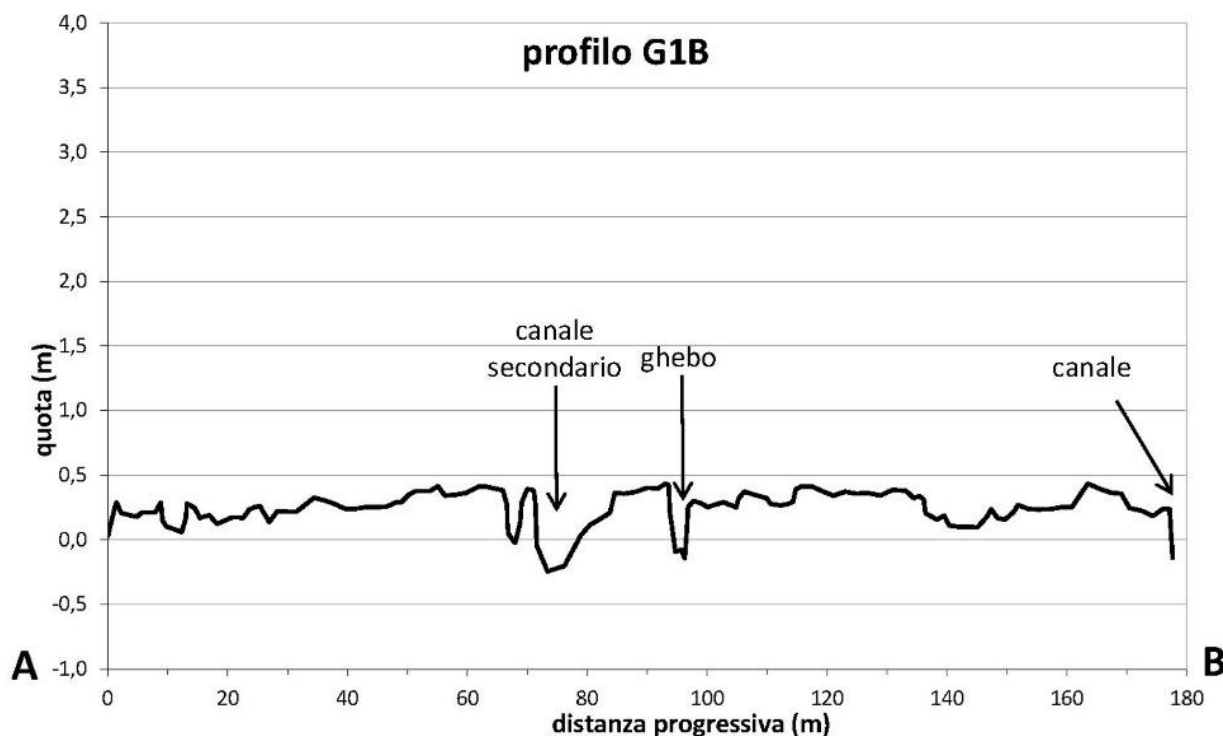


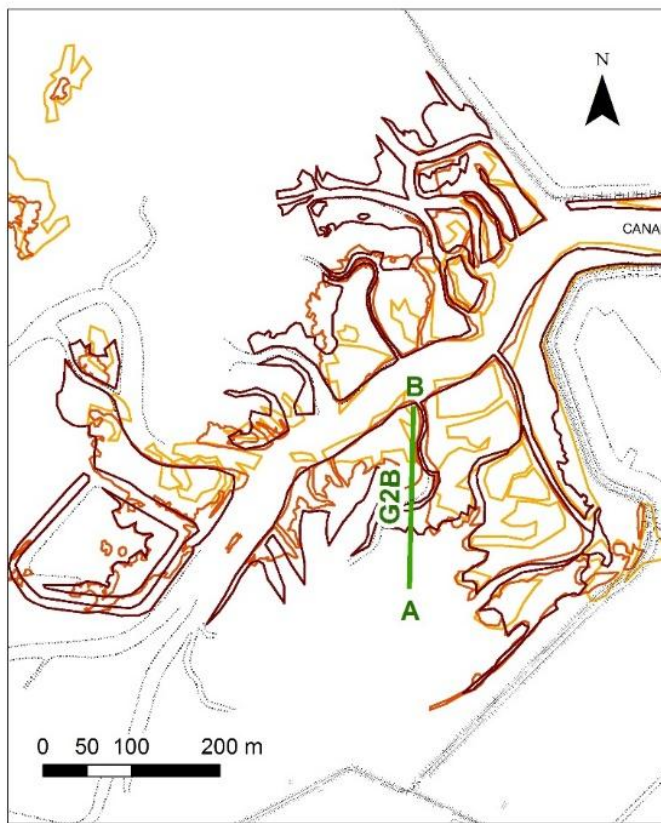
Figura 3.22 – Profilo topografico della barena G1B

Area campione G2B

Si tratta di un sistema in parte simile a quello del caso G1B, ubicato sempre nel bacino di Primero poco a nord della valle Artalina, con barene sviluppate ai bordi di un canale principale (Canale Simuta), dal quale si diramano pochi ghebi meandreggianti (Fig. 3.23). I margini si presentano quindi lineari laddove le barene bordano i canali e i confini delle valli da pesca situate a est; sono invece irregolari e frastagliati sul lato di raccordo con le velme.

Il profilo topografico (Fig. 3.24), che si estende in direzione nord sud, mostra una prima parte di barena compresa tra la velma e il ghebo di maggiori dimensioni, con quote che aumentano in maniera graduale fino al margine del ghebo, il quale si presenta più elevato (0,35m sul l.m.m.). Dopo il ghebo, la cui sezione asimmetrica tipica di un tratto a meandro è ben visibile nel profilo, si procede verso nord con un'area con quote piuttosto modeste comprese tra 0,20 e 0,30m sul l.m.m.. Essa è frequentemente interessata dalla presenza di aree depresse (chiari) o ghebi di piccole dimensioni.

La storia di questo gruppo di barene è essenzialmente di tipo accrescitivo per il periodo considerato (1954-2006), nel quale si è passati da una superficie di 5,1ha nel 1954, a 9,25ha nel 1990, a 11,2ha nel 2006.



Gli accrescimenti più significativi sono avvenuti sui margini lontani dal canale principale, laddove la barena si raccorda con la velma, ma anche in una piccola valle da pesca abbandonata posta all'estremità sud-occidentale di questo gruppo di barene.

Figura 3.23 – Rappresentazione in pianta della barena G2B e sua evoluzione nel tempo.

- Barene 2006
- Barene 1990
- Barene 1954

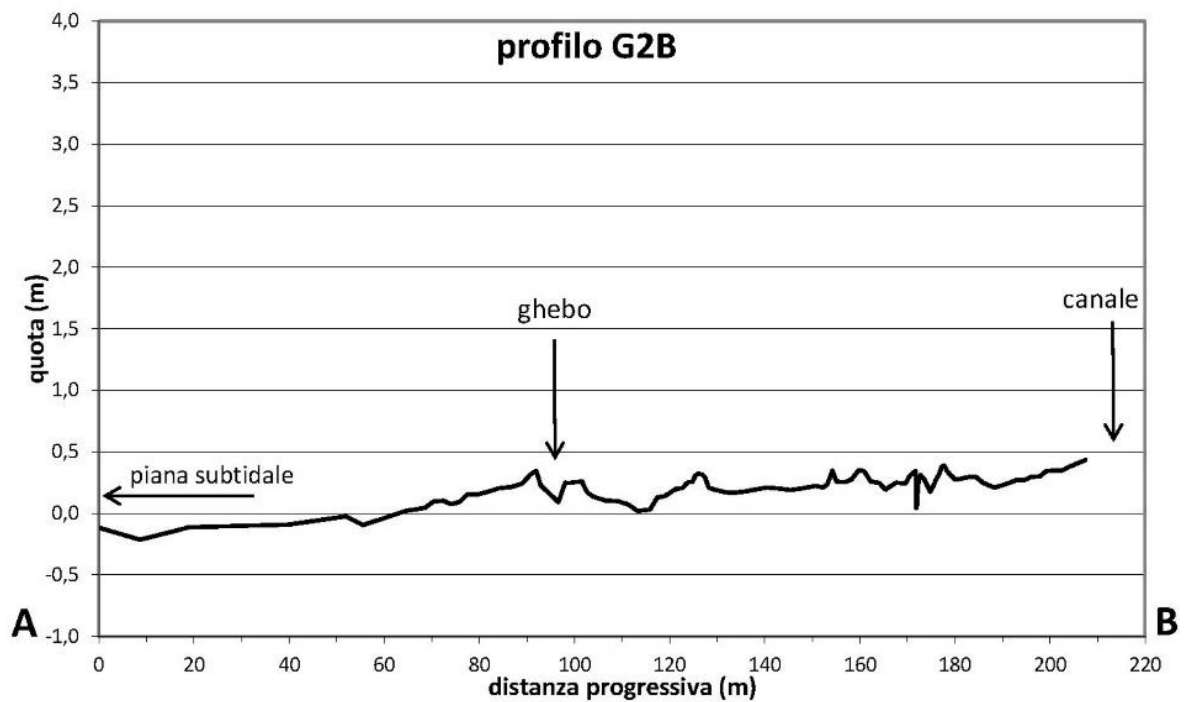
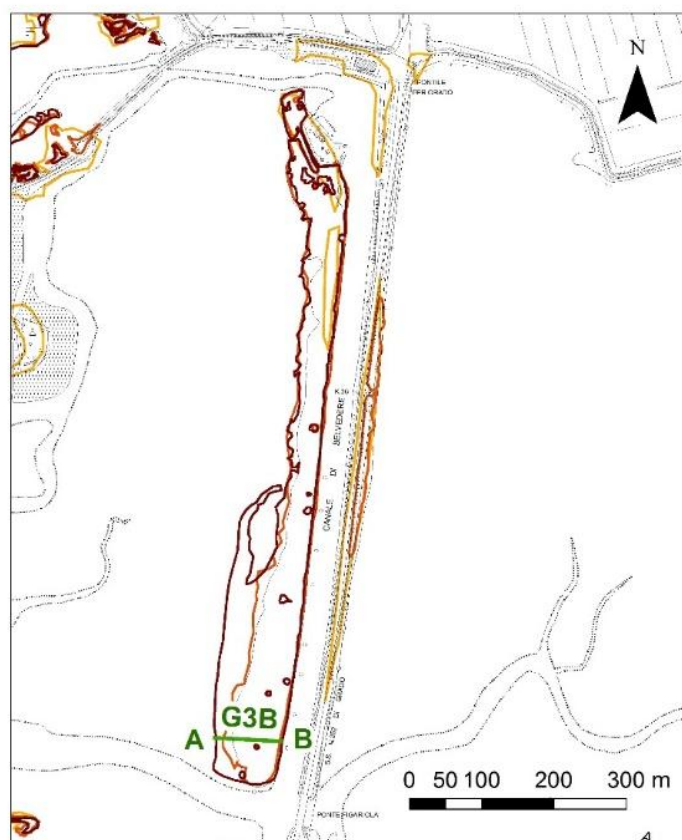


Figura 3.24 – Profilo topografico della barena G2B.

Area campione G3B

La barena si presenta allungata in direzione nord-sud e il suo lato orientale costeggia il Canale Belvedere, che scorre parallelamente al terrapieno della strada statale che congiunge Grado ad Aquileia (Fig. 3.25). L'origine di questa barena è imputabile all'escavo e al riporto a lato dei sedimenti dragati dallo stesso canale.



- Barene 2006
- Barene 1990
- Barene 1954

Figura 3.25 – Rappresentazione in pianta della barena G3B e sua evoluzione nel tempo.

dolcemente (fino a 0,34m sul l.m.m.) fino a un ghebo rettilineo con andamento nord-sud. La porzione di barena tra il ghebo e la piana tidale adiacente presenta un tipico margine rialzato (0,54m sul l.m.m.) che successivamente digrada dolcemente con una piccola berma.

Questa barena, originata dai sedimenti dragati nel canale di Belvedere, come risulta evidente dal confronto delle foto aeree del 1954-1990, mostra un accrescimento nel periodo successivo, sicuramente naturale, sul lato occidentale, che compensa la debole erosione che si verifica su quello orientale. Il risultato complessivo è un incremento della superficie che dai 4,6ha nel 1990 è passata ai 5,78ha nel 2006.

La barena presenta una superficie tabulare interrotta da una serie di chiari allineati in direzione nord-sud. Dal profilo topografico eseguito in direzione ovest-est (Fig. 3.26), nella parte più meridionale della barena, risulta evidente un margine ripido sul lato del canale Belvedere, con un gradino antistante posto a quota di circa -0,10m rispetto al l.m.m., una stretta porzione di velma (ampiezza circa 8m), e una successiva rampa di raccordo che si collega al canale adiacente. In direzione opposta è presente un margine rilevato, fino a quota di 0,6m che rappresenta probabilmente l'area di maggior apporto dei sedimenti dragati. Oltre questo margine la barena ha un andamento tabulare, con quote che si attestano attorno ai 0,5m sul l.m.m., fino alla porzione centrale dov'è presente un chiaro ampio circa 4m.

Oltre questa morfologia, procedendo verso ovest, le quote digradano

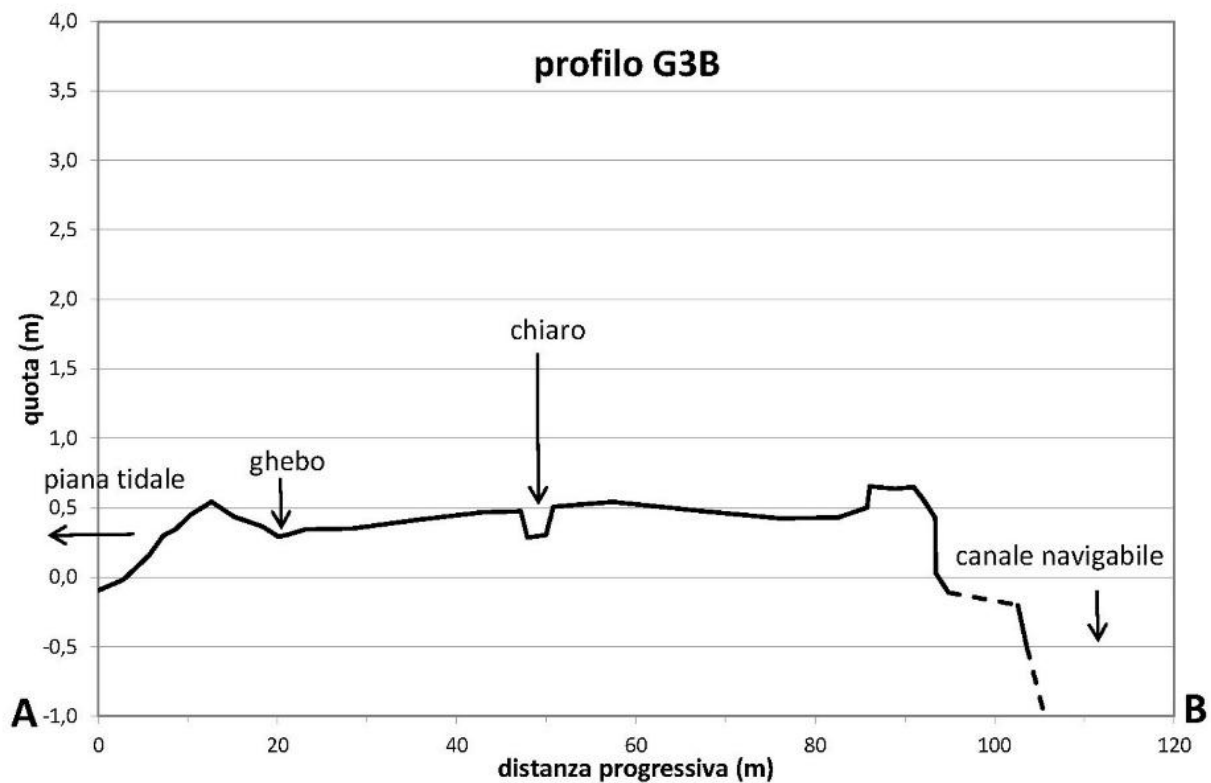


Figura 3.26 – Profilo topografico della barena G3B

Area campione G4B

La barena è essenzialmente composta da un corpo unico che costituisce parte integrante dell'isola barriera denominata Marina dei Manzi (Fig. 3.27). Essa è attualmente fronteggiata verso mare da un'area paralagunare originatasi in seguito alla formazione dei banchi sabbiosi esterni (Banco d'Orio e del Tratauri). Il margine rivolto verso l'area paralagunare si presenta continuo e regolare con morfologie tipiche di spiaggia, mentre si mostra ben più frastagliato e irregolare quello orientato verso la laguna. Tutta l'area a barena è solcata da profondi ghebi meandreggianti che drenano il riflusso di marea verso l'interno della laguna. Sono inoltre presenti cordoni litorali relitti, testimonianza dei processi litorali un tempo in atto nell'area.

Il profilo topografico (Fig. 3.28) attraversa l'intera ampiezza dell'isola in direzione nord/est sud/ovest presentando nell'ordine: una fascia di raccordo tra la velma e la barena, a debole pendenza e morfologia debolmente accidentata a causa della vegetazione che la colonizza in maniera discontinua; un'ampia area leggermente depressa al centro (tipica conformazione della barena matura), che si attesta sui 0,4m sul l.m.m. ed è solcata dai profondi meandri dei ghebi che il profilo intercetta in più punti, evidenziandone bene anche la tipica sezione asimmetrica; un cordone litorale relitto che raggiunge quota di 1m; infine una stretta fascia di raccordo con la zona paralagunare dalla tipica morfologia di spiaggia.

Il margine sud-occidentale ha avuto un accrescimento nel periodo 1954-1990 e un lievissimo arretramento negli anni successivi (fino al 2006). Il margine nord-orientale invece ha subito un'evoluzione più complessa, con un vistoso accrescimento (tra il 1954-1990) nella parte più orientale e una decisiva erosione dei corpi distaccati di barena a ovest, che erano ben evidenti nel 1954 e di cui ora non è rimasto che qualche relitto. La parte restante del margine a nord-est ha subito un accrescimento tra il 1954-1990 e un arretramento tra il 1990-2006, ma solo nella parte più esposta al vento di bora.

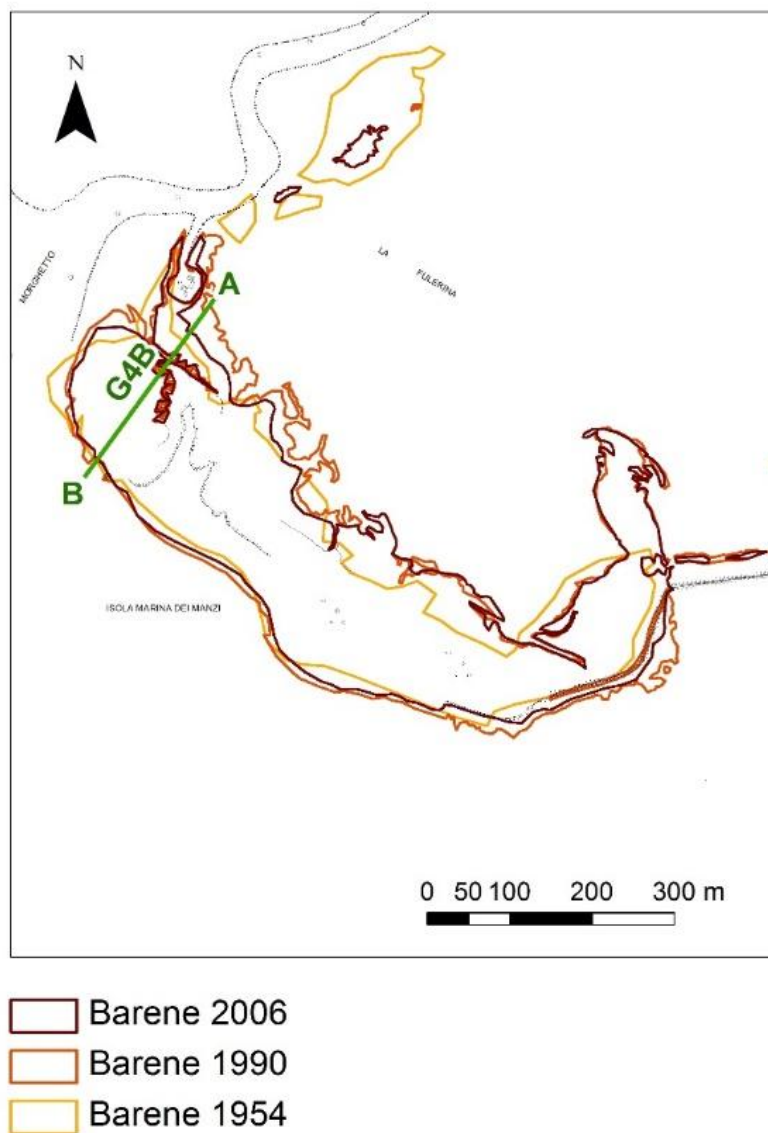


Figura 3.27 – Rappresentazione in pianta della barena G4B e sua evoluzione nel tempo.

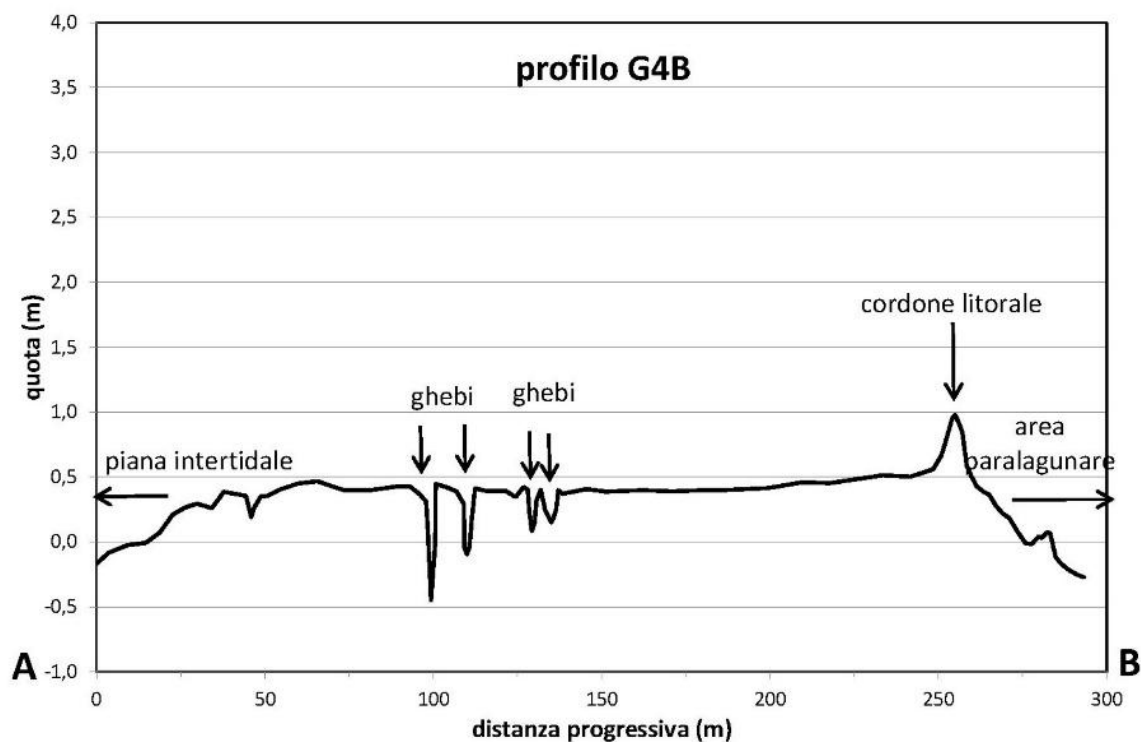


Figura 3.28 – Profilo topografico della barena G4B

Area campione G5B

La barena, ampia 8,7ha, è situata nel bacino di Buso, più precisamente nell'area denominata Isole della Gran Chiusa e fa parte di un grande complesso di barene poste sul margine settentrionale del canale di S. Giuliano, nel tratto compreso tra l'Isola di San Giuliano e la Valle del Mezzano (Fig. 3.29). L'area un tempo era interessata da arginature per valli da pesca, testimoniate dalla presenza tutt'oggi visibile di morfologie di chiara origine antropica, come ghebi rettilinei e piccoli argini rilevati. Osservando il rilievo topografico (Fig. 3.30), la barena presenta un margine piuttosto ripido e rilevato sul lato del canale, raggiungendo quote sui 0,70m sul l.m.m.. Procedendo verso l'interno della barena si nota un'area a quote digradanti comprese tra 0,50m e 0,30m sul l.m.m. Nella parte centrale il profilo intercetta un chiaro e numerosi ghebi dall'andamento tortuoso e meandreggiante. Sul lato occidentale la barena è delimitata da un ghebo rettilineo, di probabile origine artificiale.

L'area presenta fasi alterne di erosione e accrescimento nei due periodi considerati (1954-1990 e 1990-2006). L'espansione avvenuta nell'ultimo periodo riguarda soprattutto la parte meridionale del complesso di barene (nella zona di raccordo con la velma verso nord), mentre l'area interessata dal rilievo topografico e dal campionamento risulta invece stabile.

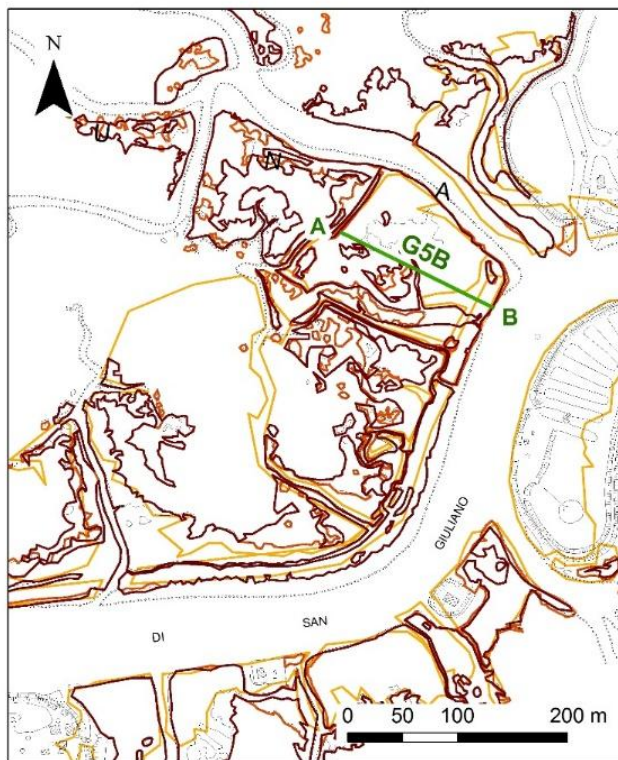


Figura 3.29 – Rappresentazione in pianta della barena G5B e sua evoluzione nel tempo.

- Barene 2006
- Barene 1990
- Barene 1954

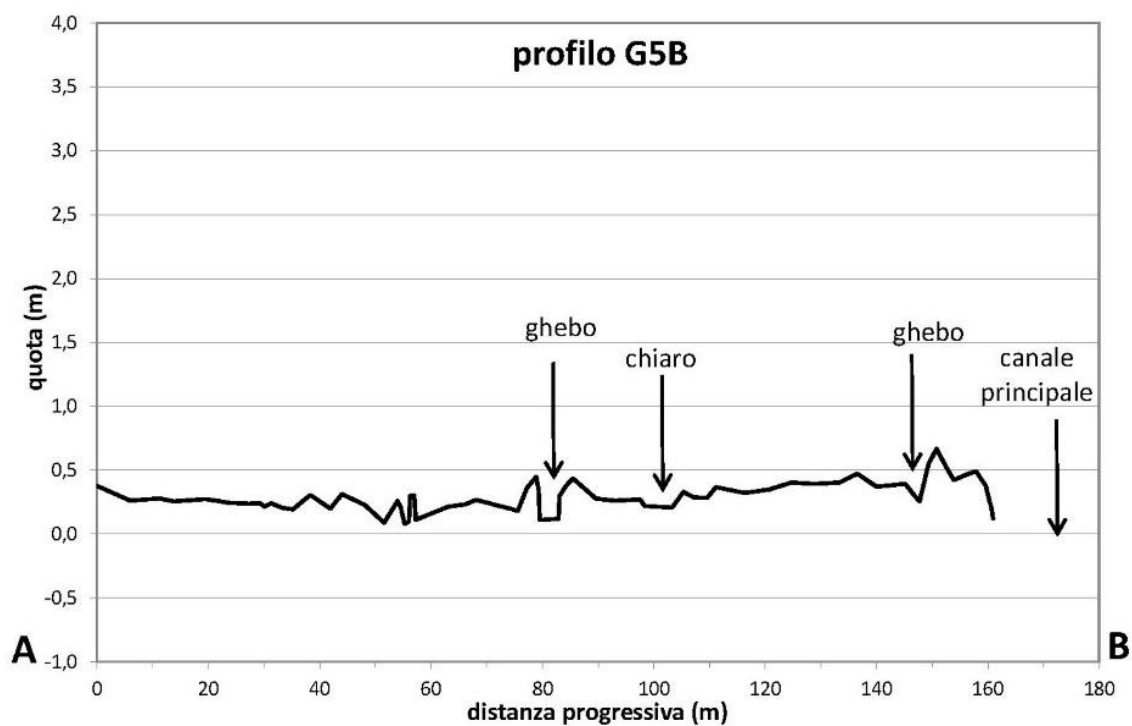
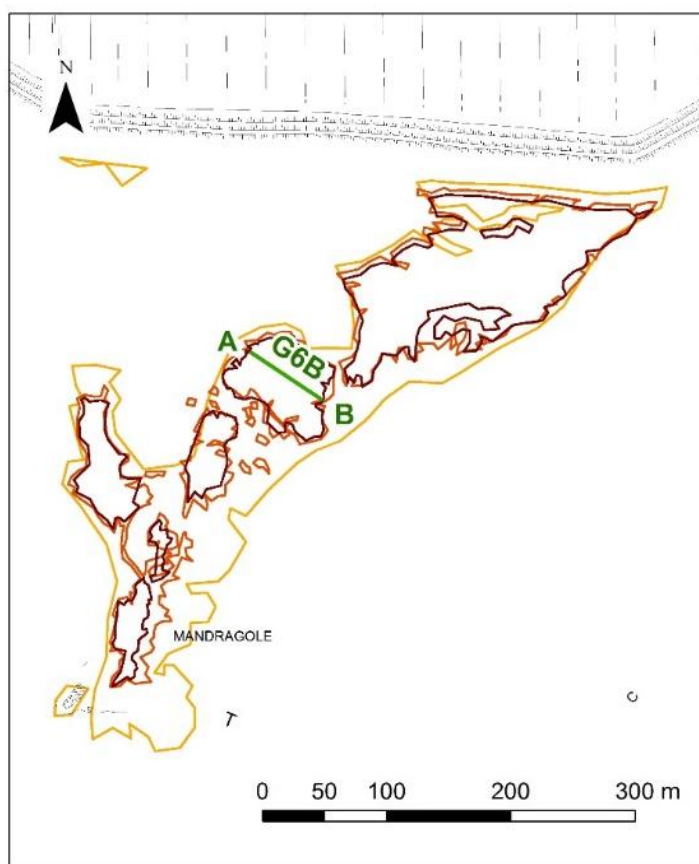


Figura 3.30 – Profilo topografico della barena G5B

Area campione G6B

Si tratta di un gruppo di barene allungato in direzione nord / est - sud / ovest adiacente all'argine di conterminazione, in un'area compresa tra la foce dell'Aussa Corno e quella del Natissa (Fig. 3.31). Esso è costituito da sei corpi principali di diversa grandezza per una superficie complessiva pari a 2,8ha; un'ulteriore corpo di piccole dimensioni posto all'estremità meridionale è interamente occupato da manufatti antropici. I margini hanno un andamento alquanto irregolare, tranne che per il tratto più settentrionale che si affaccia su un canale rettilineo che scorre parallelo all'argine di conterminazione e che è di probabile origine artificiale.

Su queste barene si manifestano in maniera molto evidente i caratteri morfologici tipici dei sistemi soggetti ad annegamento ed erosione da moto ondoso: è parzialmente visibile un sistema articolato di ghebi che drena principalmente verso il margine nord occidentale, ma che frequentemente attraversa i corpi barenali da parte a parte e si fonde in maniera indistinta con la diffusissima presenza di chiari in



- Barene 2006
- Barene 1990
- Barene 1954

Figura 3.31 – Rappresentazione in pianta della barena G6B e sua evoluzione nel tempo.

un evidente processo progressivo di frammentazione. Molti piccoli corpi sono infatti ormai distaccati da quello principale.

Il profilo topografico è stato eseguito in direzione sud/est – nord/ovest sulla barena posta al centro del gruppo e ampia 0,44ha (Fig. 3.32).

Procedendo da ovest verso est il margine della barena si eleva in maniera repentina a partire dall'adiacente velma e presenta il tipico ciglio lievemente rialzato (0,4m sul l.m.m.). La porzione centrale della barena, leggermente depressa, si mantiene a quote intorno al 0,3/0,35m. Il profilo intercetta numerosi ghebi di piccole dimensioni e alcuni chiari. Il margine sud-orientale si presenta anch'esso debolmente rialzato (0,42m la quota massima)

e si chiude con un netto gradino erosivo con un dislivello di 0,75m. Una breve superficie inclinata si raccorda poi al fondale lagunare, posto a una quota di almeno -0,6m rispetto al l.m.m..

Lungo tutto il periodo esaminato (1954-1990) il gruppo di barene ha avuto una storia di erosione, che l'ha portato, da corpo unico che era (nel 1954 con un'ampiezza totale di 6ha) a suddividersi in tanti corpi minori con una perdita progressiva di area totale (3,44ha nel 1990 e 2,8ha nel 2006). Il fenomeno erosivo comprende un vistoso arretramento soprattutto del margine sud-orientale, la frammentazione dei corpi più grandi e la sparizione dei corpi di piccole dimensioni.

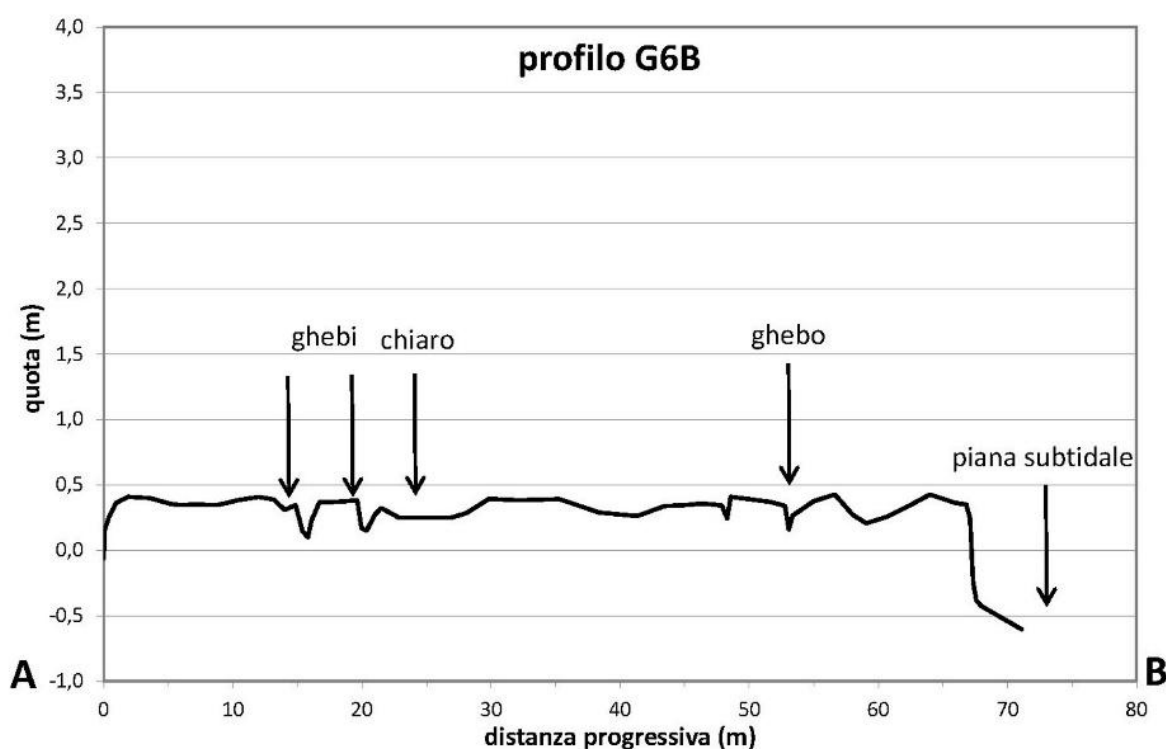


Figura 3.32 – Profilo topografico della barena G6B.

3.3.2 Interpretazione dei risultati

Grazie alle osservazioni e alle elaborazioni dei dati relativi alle aree campione si sono potute trarre considerazioni utili all'individuazione, a scala di intera laguna, sia di una classificazione morfologica (si veda par. 4.4), sia di diverse tipologie erosivo – accrescitive che saranno descritte al paragrafo 4.5.

3.4 Sedimenti

3.4.1 Risultati delle analisi sedimentologiche

I risultati delle analisi granulometriche realizzate sui 76 subcampioni prelevati dalle carote di ciascuna area campione sono riportati nella tabella 3.2, dove vengono riportate le distribuzioni granulometriche in percentuale per classi di ½ φ.

Le percentuali delle principali frazioni granulometriche (sabbia, silt e argilla), i parametri statistici (MZ=diametro medio, SD= standard deviation, SK= skewness, Kg=kurtosis) calcolati secondo Folk e Ward (1954) e la classificazione del sedimento secondo Shepard (1954) invece, sono riportate in tabella 3.3.

Sigla	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	>11.00	
G1B1 2-3	0.00	0.00	0.00	0.00	1.19	3.33	5.94	8.91	10.74	11.59	11.71	10.97	9.44	7.48	5.51	3.87	2.65	1.87	1.63	1.69	1.47	0.63	
G1B1 41-42	0.00	0.00	0.00	0.00	1.61	4.75	7.76	9.80	10.01	9.21	8.55	8.37	8.26	7.72	6.60	5.13	3.69	2.61	2.17	2.09	1.68	0.66	
G1B2 20-21	0.00	0.00	0.00	0.21	1.55	4.64	8.01	10.12	10.17	9.24	8.54	8.32	8.11	7.48	6.35	4.97	3.62	2.60	2.18	2.13	1.74	0.71	
G2B1 36-37	0.00	0.00	0.00	0.10	1.53	5.74	9.96	11.83	10.74	9.78	7.78	7.79	7.91	7.40	6.17	4.59	3.09	2.04	1.64	1.61	1.31	0.50	
G1B2 6-7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	1.73	4.62	7.29	9.19	10.49	11.06	10.94	10.13	8.76	7.07	5.33	3.80	2.69	2.24	2.21	1.86	0.80	
G1B1 19-20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	3.38	5.40	7.68	9.08	9.88	10.18	10.04	9.42	8.34	6.91	5.37	3.93	2.84	2.37	2.32	1.95	0.86	
G1B2 37-38	0.00	0.00	0.00	0.21	1.71	3.44	6.14	8.42	9.14	8.76	8.36	8.40	8.55	8.31	7.43	6.03	4.49	3.25	2.70	2.58	2.08	0.85	
G2B1 3-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	2.18	5.34	7.17	8.62	9.70	10.48	10.81	10.41	9.25	7.54	5.65	3.94	2.71	2.22	2.15	1.74	0.68	
G2B1 11.5-12.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	1.89	4.69	6.98	8.68	9.65	10.17	10.40	10.16	9.27	7.79	6.01	4.31	3.02	2.47	2.37	1.91	0.76	
G2B1 24-25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	1.65	5.49	7.47	9.00	9.80	10.05	10.29	10.15	9.31	7.78	5.91	4.10	2.75	2.19	2.13	1.76	0.72	
G2B2 5-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	1.41	2.78	4.58	6.58	8.70	10.61	11.76	11.73	10.63	8.85	6.79	4.81	3.29	2.58	2.42	1.92	0.72	
G2B2 20-21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.71	3.98	6.26	8.96	10.25	10.89	10.83	10.13	8.95	7.43	5.79	4.26	3.10	2.64	2.61	2.21	0.98	
G2B2 42-43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.18	6.35	8.94	9.77	9.48	9.24	9.37	9.40	8.79	7.41	5.61	3.87	2.61	2.13	2.10	1.74	0.71	
G3B1 4-5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	3.47	6.94	9.10	10.46	11.22	11.32	10.73	9.54	7.90	6.03	4.20	2.82	2.21	2.12	1.73	0.70	
G3B1 11.5-12.5	5.13	9.03	11.02	9.55	6.19	3.81	3.45	4.15	4.76	5.07	5.29	5.41	5.25	4.73	3.98	3.16	2.39	1.78	1.48	1.40	1.13	0.47	
G3B1 20-21	2.13	14.61	28.16	29.48	17.37	4.93	0.26	0.03	0.80	0.88	0.44	0.18	0.17	0.22	0.21	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
G3B1 42-43	5.77	21.25	30.73	21.86	6.97	0.50	0.00	0.00	0.62	1.38	1.29	1.10	1.16	1.33	1.39	1.28	1.05	0.77	0.52	0.39	0.35	0.28	0.08
G3B2 4-5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.10	6.84	8.77	9.76	10.37	10.64	10.33	9.48	8.21	6.68	5.02	3.55	2.76	2.51	1.99	0.82	
G3B2 27.5-28.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.69	3.11	5.18	7.51	9.71	11.48	12.22	11.74	10.25	8.21	6.08	4.35	3.44	3.11	2.48	1.04	
G3B2 41-42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	2.62	4.83	7.05	9.58	11.62	12.45	11.92	10.37	8.32	6.27	4.62	3.75	3.42	2.74	1.18	
G4B1 12-13	1.54	16.24	35.74	30.50	9.53	0.51	0.00	0.20	1.12	1.07	0.68	0.58	0.67	0.65	0.50	0.32	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
G4B1 25-26	0.86	2.18	3.85	5.86	7.51	8.61	9.40	9.75	9.41	8.59	7.66	6.70	5.59	4.33	3.10	2.08	1.34	0.90	0.77	0.81	0.70	0.25	
G4B1 42-43	1.35	11.63	21.76	22.52	13.53	4.07	0.82	4.55	2.82	2.99	2.79	2.80	2.85	2.60	2.02	1.36	0.83	0.51	0.44	0.50	0.47	0.21	
G4B2 4-5	1.14	3.14	4.63	5.25	5.45	6.06	7.24	8.47	9.18	9.30	8.87	7.93	6.56	5.02	3.62	2.53	1.72	1.18	0.97	0.96	0.79	0.27	
G4B2 8-9	0.17	10.47	29.09	33.51	17.34	2.92	0.00	0.03	1.08	1.22	0.74	0.53	0.65	0.76	0.68	0.49	0.30	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
G4B2 19-20	1.43	4.57	7.43	8.75	8.11	6.80	6.54	8.88	7.06	6.88	6.54	6.14	5.52	4.63	3.63	2.68	1.89	1.33	1.10	1.09	0.91	0.36	
G4B2 39-40	0.40	11.02	29.08	33.03	17.35	3.14	0.01	0.03	1.05	1.24	0.78	0.53	0.59	0.66	0.56	0.38	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
G5B1 8-9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.56	11.20	13.84	13.47	12.10	10.41	8.70	7.02	5.39	3.96	2.82	2.02	1.67	1.58	1.25	0.43	
G5B1 23-24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.98	7.09	9.46	11.62	12.96	13.25	12.04	9.60	6.76	4.35	2.82	2.23	2.13	1.70	0.59	
G5B1 36-37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.39	7.00	9.07	11.17	12.77	13.16	12.05	9.73	6.98	4.57	2.97	2.31	2.15	1.67	0.58	
G5B2 5-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.18	11.01	14.93	14.54	13.26	11.46	9.27	6.89	4.67	2.95	1.81	1.17	0.99	1.03	0.84	0.20	
G5B2 24-25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	4.52	8.00	10.32	12.08	13.36	13.41	11.80	9.01	6.05	3.75	2.37	1.88	1.81	1.41	0.47	
G5B2 38-38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	4.18	7.48	9.80	11.43	12.52	12.54	11.30	9.16	6.79	4.73	3.25	2.56	2.32	1.78	0.64	
G6B1 5-6 <62.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	1.70	4.00	6.69	9.27	11.42	12.78	12.90	11.68	9.48	6.97	4.69	3.00	2.12	1.75	1.20	0.30	
G6B1 15-16 <62.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	2.07	5.15	8.54	11.11	12.43	12.59	11.78	10.22	8.19	6.06	4.13	2.70	1.95	1.63	1.14	0.29	
G6B1 29-30 <62.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	1.72	3.95	6.29	8.48	10.40	11.74	12.03	11.23	9.66	7.77	5.86	4.12	2.92	2.19	1.34	0.24	
G6B2 8-9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.77	8.13	10.34	12.23	12.98	12.34	10.69	8.62	6.32	4.40	3.00	2.34	2.17	1.75	0.69	
G6B2 18-19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	3.91	6.42	8.29	10.19	11.73	12.40	11.86	10.14	7.76	5.45	3.76	2.97	2.73	2.18	0.88	
G6B2 33-34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	2.39	4.78	6.75	9.42	11.53	12.57	12.29	10.83	8.73	6.54	4.74	3.68	3.14	2.32	0.81	
G7B1 5-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.87	5.63	7.84	10.43	12.99	14.32	13.53	10.89	7.58	4.75	2.89	1.90	1.59	1.56	1.24	0.37	
G7B1 17.5-18.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.99	6.10	8.97	10.80	12.14	12.81	12.19	10.28	7.69	5.23	3.39	2.28	1.87	1.81	1.45	0.50	
G7B1 35-36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.83	4.54	6.41	8.32	10.13	11.46	11.83	11.08	9.45	7.42	5.41	3.78	2.90	2.53	1.90	0.68	
G7B2 9-10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.11	11.40	14.27	14.56	13.76	12.00	9.49	6.74	4.31	2.57	1.51	0.96	0.81	0.84	0.67	0.14	
G7B2 21-22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.86	5.83	8.58	10.46	11.81	12.73	12.49	10.80	8.15	5.47	3.43	2.24	1.84	1.81	1.47	0.52	
G7B2 39-40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.48	6.31	9.13	10.33	10.78	10.81	10.54	9.59	8.01	6.22	4.57	3.31	2.67	2.42	1.84	0.67	
M3B1 5-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.49	6.49	9.05	10.48	11.43	11.74	11.09	9.58	7.61	5.66	4.01	2.85	2.37	2.28	1.87	0.74	
M3B1 16-17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.81	6.19	8.21	9.75	11.06	11.93	11.76	10.45	8.40	6.19	4.26	2.90	2.30	2.14	1.66	0.58	
M3B1 37-38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.18	4.81	6.52	7.96	9.47	10.70	11.15	10.60	9.26	7.55	5.63	4.40	3.63	3.32	2.63	1.07	
M3B2 12-13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.85	3.71	5.96	7.96	9.90	11.61	12.37	11.78	9.98	7.63	5.40	3.78	3.02	2.81	2.25	0.89	
M3B2 24-25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.27	6.18	7.94	9.14	10.05	10.80	10.98	10.24	8.65	6.69	4.86	3.50	2.86	2.68	2.15	0.86	
M3B2 37-38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.27	6.04	8.18	10.04	11.36	11.94	11.51	10.12	8.12	6.02	4.22	2.92	2.33	2.18	1.75	0.66	
M4B1 9-10	1.50	6.94	13.07	15.54	12.97	9.02	7.16	7.16	7.01	5.85	4.26	2.95	2.09	1.49	1.01	0.63	0.37	0.21	0.20	0.28	0.27	0.08	
M4B1 20-21	2.58	8.88	15.83	17.49	12.47	6.33	4.08	5.05	6.03	5.57	4.27	3.09	2.30	1.76	1.29	0.88	0.56	0.36	0.34	0.42	0.39	0.11	
M4B1 28-29	0.03	4.93	13.51	18.80	16.85	10.82	6.61	5.61	5.38	4.32													

Sigla	sand (%)	silt (%)	clay 4 μ (%)	Mz (ϕ)	SD (ϕ)	Sk	Kg	Classe (Shepard)
G1B1 2-3	10.4	75.9	13.7	5.97	1.75	0.16	1.04	silt
G1B1 41-42	14.0	68.1	17.9	6.04	1.97	0.15	0.91	silt argilloso
G1B2 20-21	14.3	67.8	17.8	6.02	1.98	0.17	0.91	silt argilloso
G2B1 36-37	17.2	68.1	14.7	5.79	1.91	0.20	0.87	silt sabbioso
G1B2 6-7	6.9	74.3	18.8	6.34	1.81	0.14	1.01	silt argilloso
G1B1 19-20	9.6	70.9	19.5	6.28	1.91	0.13	0.98	silt argilloso
G1B2 37-38	11.4	66.8	21.8	6.31	2.02	0.10	0.90	silt argilloso
G2B1 3-4	7.6	73.5	19.0	6.36	1.82	0.10	0.99	silt argilloso
G2B1 11.5-12.5	6.7	72.6	20.7	6.45	1.84	0.11	0.97	silt argilloso
G2B1 24-25	7.2	73.3	19.4	6.37	1.82	0.10	0.96	silt argilloso
G2B2 5-6	4.7	72.9	22.4	6.69	1.74	0.08	1.04	silt argilloso
G2B2 20-21	5.6	73.0	21.4	6.50	1.83	0.15	0.99	silt argilloso
G2B2 42-43	9.5	71.9	18.6	6.24	1.88	0.12	0.92	silt argilloso
G3B1 4-5	3.7	76.7	19.7	6.48	1.72	0.14	0.97	silt
G3B1 11.5-12.5	49.8	38.5	11.8	4.31	2.76	0.20	0.75	sabbia siltosa
G3B1 20-21	96.9	2.9	0.1	2.11	0.66	0.09	1.05	sabbia
G3B1 42-43	87.0	9.5	3.4	1.98	1.37	0.45	2.80	sabbia
G3B2 4-5	3.1	73.8	23.1	6.62	1.78	0.13	0.94	silt argilloso
G3B2 27.5-28.5	1.1	70.4	28.4	7.07	1.67	0.10	1.01	silt argilloso
G3B2 41-42	0.5	69.6	29.9	7.17	1.66	0.12	1.01	silt argilloso
G4B1 12-13	94.1	5.5	0.5	1.97	0.83	0.29	2.03	sabbia
G4B1 25-26	38.2	55.0	6.8	4.71	2.03	0.11	0.96	silt sabbioso
G4B1 42-43	75.3	20.4	4.3	3.21	2.04	0.64	1.47	sabbia
G4B2 4-5	32.8	58.8	8.4	4.91	2.18	0.00	0.99	silt sabbioso
G4B2 8-9	93.5	5.7	0.8	2.19	0.90	0.30	2.00	sabbia
G4B2 19-20	43.6	47.1	9.3	4.58	2.38	0.13	0.84	silt sabbioso
G4B2 39-40	94.0	5.4	0.5	2.17	0.87	0.29	1.89	sabbia
G5B1 8-9	4.5	81.8	13.7	6.02	1.62	0.28	0.99	silt
G5B1 23-24	0.0	79.5	20.5	6.75	1.54	0.12	1.03	silt
G5B1 36-37	0.0	78.9	21.1	6.77	1.56	0.11	1.03	silt
G5B2 5-6	5.2	85.9	9.0	5.82	1.43	0.23	1.00	silt
G5B2 24-25	0.2	82.1	17.7	6.61	1.50	0.12	1.03	silt
G5B2 38-38	0.2	77.9	21.9	6.76	1.60	0.14	1.00	silt
G6B1 5-6 <62.5	2.0	78.0	20.0	6.70	1.55	0.08	1.01	silt
G6B1 15-16 <62.5	2.4	79.8	17.8	6.51	1.57	0.13	0.99	silt
G6B1 29-30 <62.5	2.0	73.6	24.4	6.85	1.64	0.07	0.98	silt argilloso
G6B2 8-9	0.0	79.4	20.6	6.68	1.59	0.16	1.01	silt
G6B2 18-19	0.2	74.3	25.5	6.93	1.64	0.10	1.01	silt argilloso
G6B2 33-34	0.3	70.0	29.7	7.18	1.62	0.10	1.00	silt argilloso
G7B1 5-6	2.9	82.9	14.3	6.40	1.50	0.10	1.10	silt
G7B1 17.5-18.5	3.0	80.6	16.4	6.41	1.59	0.12	1.04	silt
G7B1 35-36	2.8	72.7	24.5	6.82	1.71	0.08	1.01	silt argilloso
G7B2 9-10	6.1	86.4	7.5	5.75	1.38	0.18	0.99	silt
G7B2 21-22	2.8	80.4	16.7	6.45	1.59	0.10	1.04	silt
G7B2 39-40	3.5	75.0	21.6	6.57	1.76	0.14	0.96	silt argilloso
M3B1 5-6	3.5	76.9	19.6	6.50	1.72	0.15	1.01	silt
M3B1 16-17	2.8	77.3	19.9	6.57	1.68	0.11	1.00	silt
M3B1 37-38	2.2	69.7	28.1	6.95	1.80	0.09	0.97	silt argilloso
M3B2 12-13	1.8	72.6	25.6	6.92	1.68	0.09	1.03	silt argilloso
M3B2 24-25	3.2	73.4	23.4	6.68	1.78	0.10	0.97	silt argilloso
M3B2 37-38	3.3	76.8	20.0	6.55	1.70	0.13	1.01	silt
M4B1 9-10	66.2	31.8	2.0	3.37	1.73	0.35	0.92	sabbia siltosa
M4B1 20-21	67.6	29.3	3.1	3.27	1.89	0.47	0.91	sabbia siltosa
M4B1 28-29	71.4	24.8	3.8	3.32	1.72	0.47	1.15	sabbia siltosa
M4B2 9-10	3.9	81.4	14.7	6.25	1.60	0.15	1.02	silt
M4B2 23-24	40.9	51.4	7.7	4.68	2.05	0.21	1.01	silt sabbioso
M4B2 35-36	62.0	29.5	8.5	4.02	2.22	0.50	0.99	sabbia siltosa
M5B1 5-6	1.2	81.8	17.1	6.52	1.50	0.23	1.06	silt
M5B1 20-21	1.0	71.5	27.5	6.98	1.71	0.14	0.96	silt argilloso
M5B1 31-32	0.9	73.9	25.2	6.92	1.60	0.11	0.99	silt argilloso
M5B2 4-5	1.2	84.8	14.0	6.37	1.45	0.19	1.07	silt
M5B2 20-21	0.7	72.4	26.9	7.00	1.66	0.15	1.01	silt argilloso
M5B2 38-39	0.2	67.3	32.5	7.29	1.66	0.11	0.99	silt argilloso
M6B1 2-3	1.4	87.4	11.1	6.00	1.44	0.26	1.06	silt
M6B1 16-17	38.8	47.6	13.6	5.09	2.18	0.42	0.89	silt sabbioso
M6B1 33-34	13.5	66.6	20.0	6.23	2.06	0.04	0.98	silt argilloso
M6B2 10-11	2.4	85.4	12.2	6.08	1.52	0.20	0.98	silt
M6B2 28-29	46.9	44.6	8.5	4.60	1.89	0.43	1.27	sabbia siltosa
M6B2 43-44	32.3	55.8	11.9	5.17	2.06	0.33	0.95	silt sabbioso
M7B1 3-4	77.4	20.4	2.2	3.11	1.68	0.52	1.43	sabbia
M7B1 17-18	96.3	3.4	0.3	2.23	0.63	0.07	1.05	sabbia
M7B1 27-28	97.7	2.3	0.0	1.98	0.56	0.03	0.99	sabbia
M7B2 4-5	2.4	87.1	10.5	5.97	1.44	0.22	0.98	silt
M7B2 19-20	2.6	78.2	19.2	6.49	1.69	0.16	1.00	silt
M7B2 29-30	0.6	69.4	30.0	7.13	1.69	0.09	0.99	silt argilloso
M7B2 43-44	78.7	16.7	4.7	3.14	1.86	0.59	1.82	sabbia

Tabella 3.3 – Principali dati ottenuti per i campioni di sedimento: percentuale in sabbia, silt e argilla, parametri statistici secondo Folk & Ward 1954 (MZ, SD, Sk, Kg) e classificazione del sedimento secondo Shepard.

Le analisi granulometriche hanno evidenziato che su 76 subcampioni analizzati 10 sono costituiti da sabbia, 6 da sabbia siltosa, 7 da silt sabbioso, 25 da silt e 28 da silt argilloso.

Tutti i campioni presentano MZ (diametro medio) compreso tra 1.97ϕ e 7.29ϕ . Le granulometrie maggiori sono state rilevate nel campione G4B1_12-13 raccolto nella stazione di campionamento situata alle spalle dell'isola barriera di Marina dei Manzi, mentre le granulometrie minori nel campione M5B2_38-39 appartenente alle barene di margine lagunare situate vicino a Marano nel bacino di Lignano. Secondo la classificazione di Wentworth il diametro medio di 4 campioni ricade nel campo della sabbia media, 3 nella sabbia fine, 6 nella sabbia molto fine, 7 nel silt grossolano, 7 nel silt medio, 43 nel campo del silt fine e 6 in quello del silt finissimo.

Per quel che riguarda la classazione nessun campione risulta molto ben classato o ben classato, 6 campioni risultano moderatamente classati ($0.5 < SD < 1 \phi$), 49 mal classati ($1 < SD < 2 \phi$), 21 molto mal classati ($2 < SD < 4 \phi$).

A una distribuzione simmetrica corrispondono 13 campioni ($-10 < Sk < 10$), 51 sono caratterizzati da un'asimmetria positiva, 12 da un'asimmetria molto positiva.

3.4.2 Analisi statistica

È stata applicata un'analisi multivariata (*cluster analysis*) utilizzando l'insieme dei dati riguardanti le frequenze percentuali delle classi granulometriche, suddivise in intervalli pari a $\frac{1}{2} \phi$. La procedura adottata permette di rappresentare i campioni secondo un ordine gerarchico, rappresentato graficamente da un dendrogramma, nel quale sull'asse delle ascisse sono riportate le singole unità mentre sull'asse delle ordinate è riportato il livello di distanza tra i vari raggruppamenti stabiliti (Fig. 3.33a). La distanza definisce il massimo valore di similarità in cui tutte le unità sono simili tra loro e sono racchiuse in un unico grande gruppo. Inizialmente mediante il programma di elaborazione statistica *STATISTICA 7.0* si è utilizzato il metodo *joining – single linkage* con calcolo delle distanze euclidee per la gerarchizzazione dei campioni e successivamente una *cluster analysis* col metodo *K-means* per estrarre il numero di gruppi discriminato sulla base del *joining*.

Si è così ottenuta una suddivisione in 5 cluster la cui distribuzione media è riportata in figura 3.33b. Nelle figure 3.34, 3.35, 3.36, 3.37 e 3.38 sono inoltre riportate le curve di distribuzione granulometrica per ciascun gruppo di campioni.

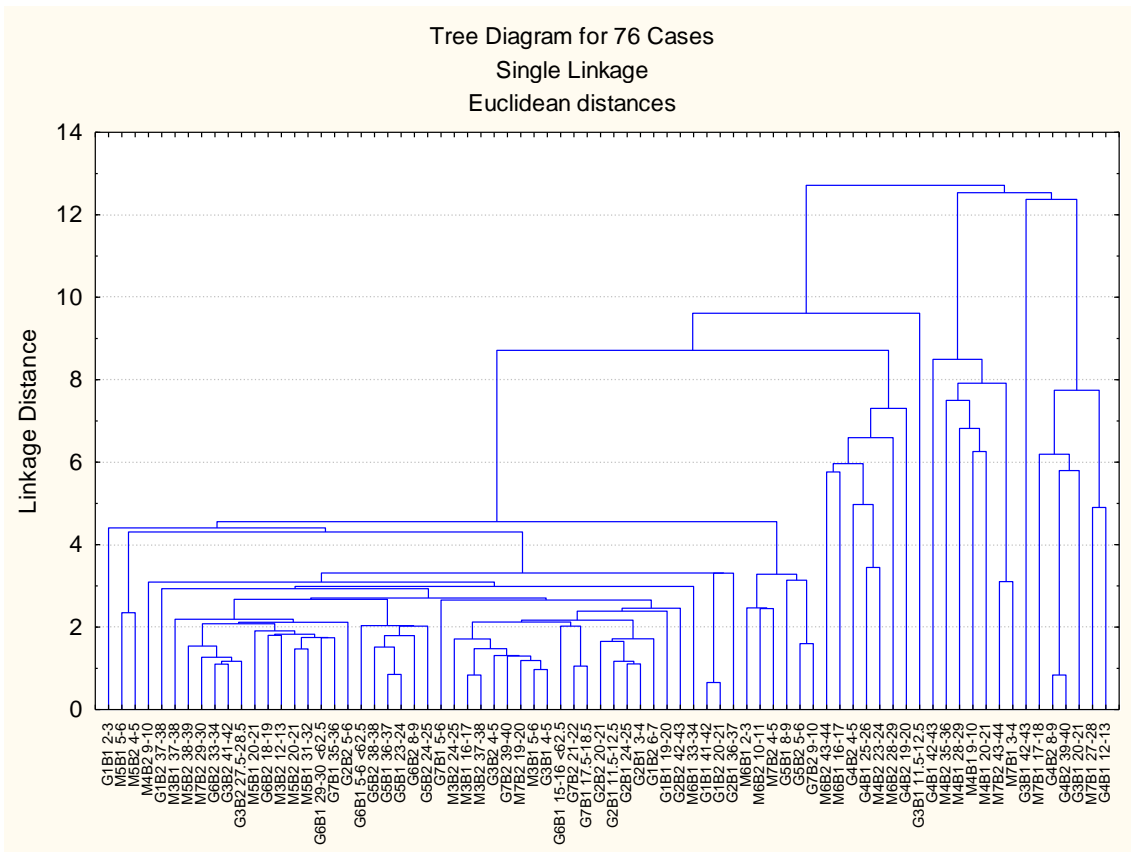


Figura 3.33a – Dendrogramma dei campioni.

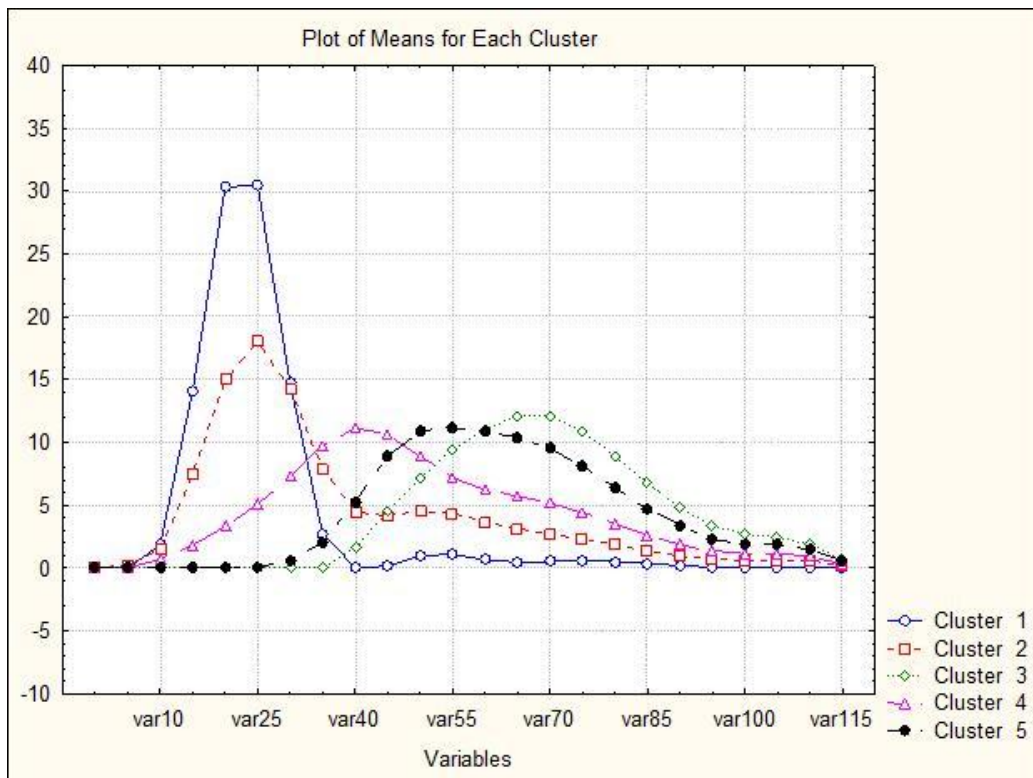


Figura 3.33b – Curva di distribuzione media per ogni cluster.

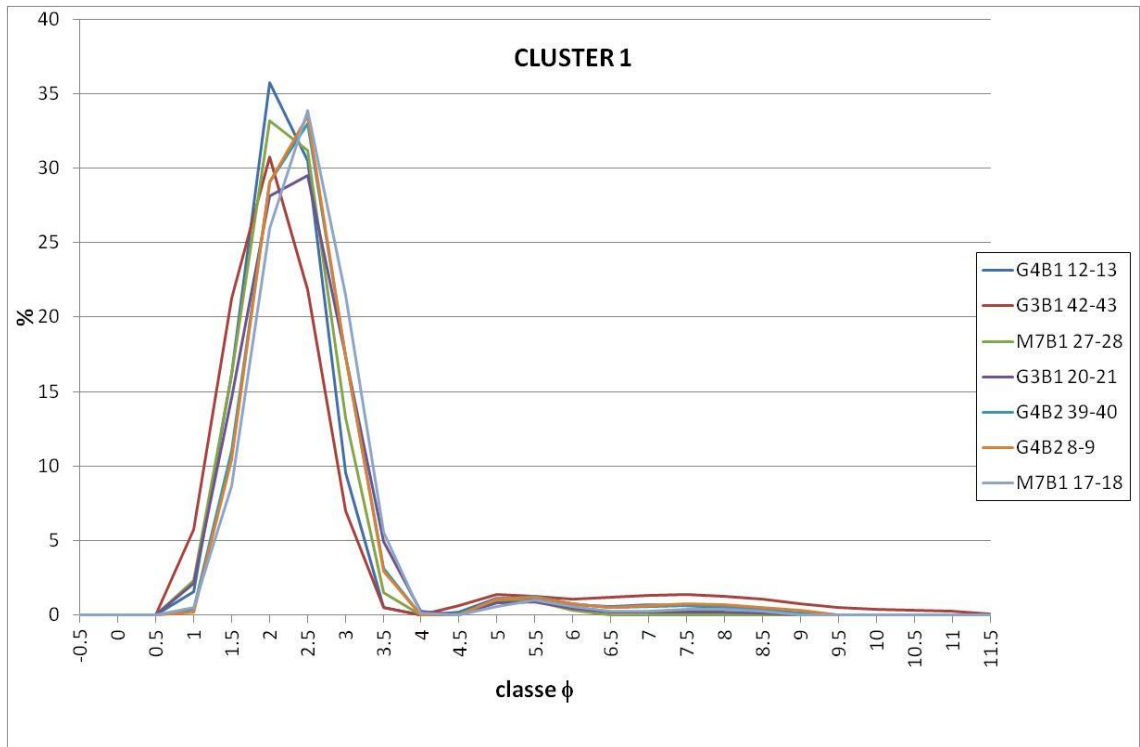


Figura 3.34 – Distribuzioni di frequenza in unità ϕ dei campioni raggruppati nel cluster 1.

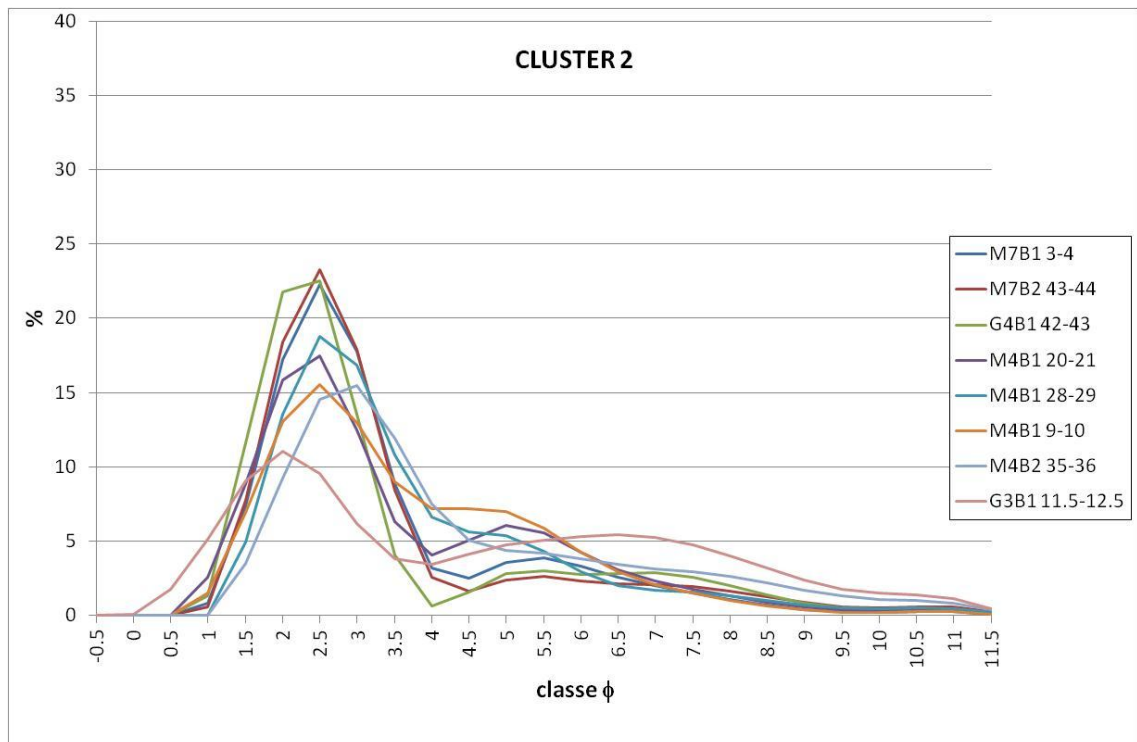


Figura 3.35 – Distribuzioni di frequenza in unità ϕ dei campioni raggruppati nel cluster 2.

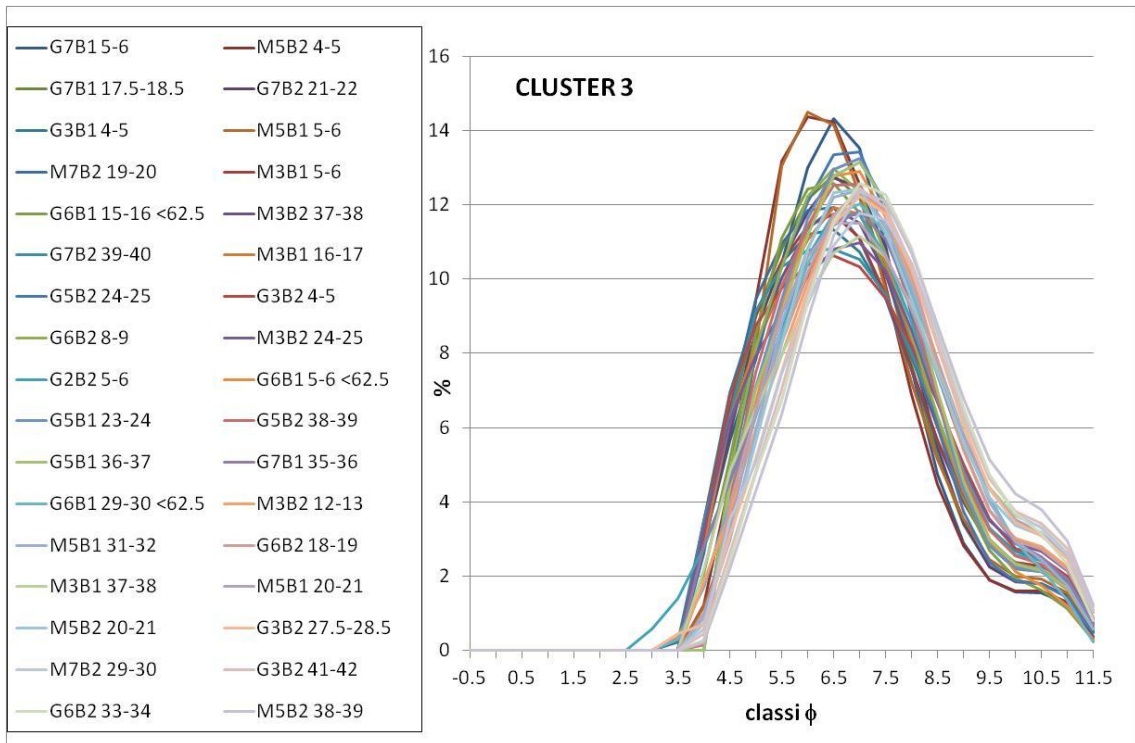


Figura 3.36 - Distribuzioni di frequenza in unità ϕ dei campioni raggruppati nel cluster 3.

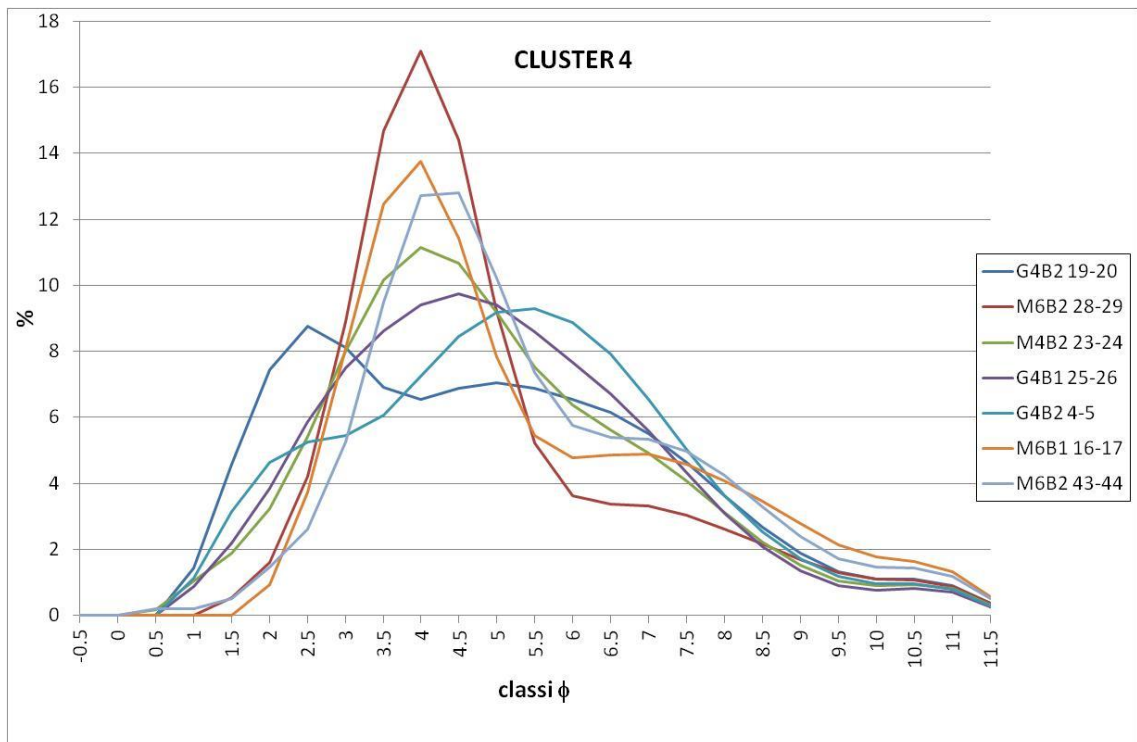


Figura 3.37 - Distribuzioni di frequenza in unità ϕ dei campioni raggruppati nel cluster 4.

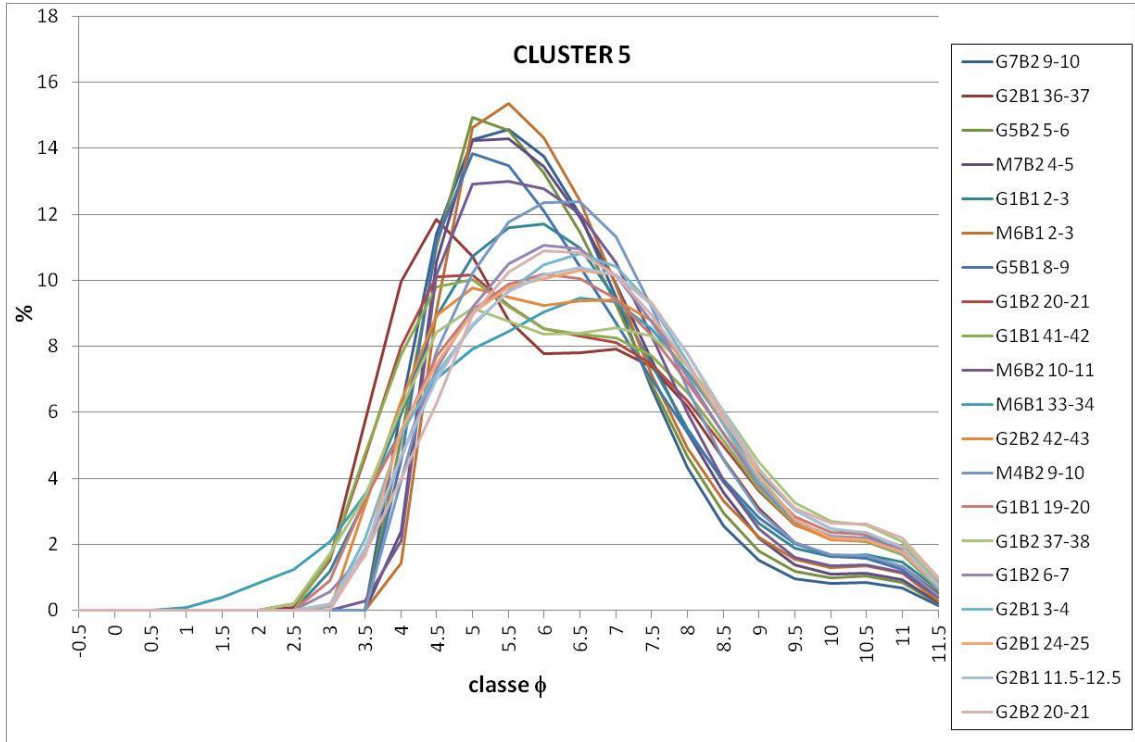


Figura 3.38 - Distribuzioni di frequenza in unità ϕ dei campioni raggruppati nel cluster 5.

Dalla rappresentazione del diagramma bivariato Mz/SD (Fig. 3.39) si nota una buona distinzione tra i cinque cluster individuati dall'analisi statistica, che si collocano in campi d'esistenza ben definiti (Fig. 3.39).

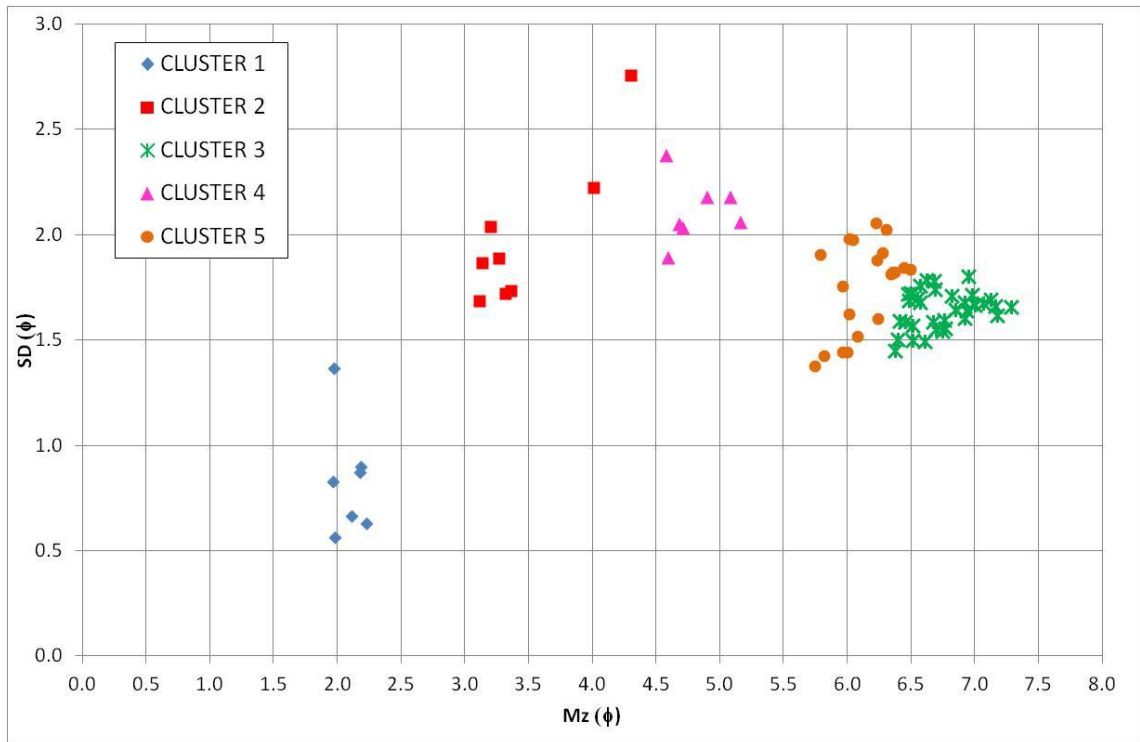


Figura 3.39 – Grafico bivariato Mz/SD , che mostra i raggruppamenti dei cluster.

3.4.3 Interpretazione dei risultati granulometrici

Approfondendo la discussione a proposito degli aspetti granulometrici, dall'analisi dei cluster è possibile individuare una relazione fra la granulometria dei sedimenti e la distribuzione dei vari livelli energetici caratterizzanti la laguna.

Nel **cluster 1** sono raggruppati per la maggior parte i sedimenti appartenenti ai campioni raccolti nelle stazioni G4B e M7B. Questi sedimenti, caratterizzati dalle granulometrie maggiori ($1.97 < Mz < 2.23 \phi$) dell'intero dataset, sono stati prelevati nelle barene di retrobarriera situate alle spalle delle isole barriera di S.Andrea e Marina dei Manzi. La dominanza della sabbia (>93%) e la sua granulometria (sabbia medio-fine) sono elementi tipici degli ambienti di spiaggia / *washover*. Ricadono inoltre in questo cluster due campioni della parte inferiore della carota G3B1 (Canale Belvedere). I sedimenti superficiali sono tipici di ambienti deposizionali a bassa energia mentre quelli più profondi, tra i 20-45cm, sono tipici di ambienti ad alta energia, simili a quelli situati in prossimità delle bocche lagunari e lungo i canali lagunari principali (Brambati, 1969). La presenza di questi sedimenti concorre a rafforzare l'ipotesi che si tratti di una barena di origine artificiale, sviluppatasi in seguito alla pratica di escavo del canale adiacente, probabilmente con riporto del sedimento sul bordo.

Il **cluster 2** raccoglie subcampioni di sedimento prelevati soprattutto nel sito M4B alle spalle dell'isola di Martignano, ma anche alcuni campioni nei siti G4B e M7B già richiamati nel cluster precedente. Il sito M4B rappresenta un ambiente deposizionale relitto d'isola barriera, la cui morfologia è caratterizzata da strutture a *beach ridges* di forma arcuata, probabilmente imputabili alla presenza di antiche bocche tidali o brecce di *washover*. Il sito è rimasto successivamente relegato in una posizione arretrata a causa dello sviluppo successivo di banchi sabbiosi emersi verso mare. L'energia di trasporto si poteva quindi supporre di medio tenore, tale da selezionare la deposizione di sedimenti la cui granulometria è tipica delle sabbie fini ($3 < Mz < 4\phi$).

I cluster 1 e 2 rappresentano quindi differenti momenti deposizionali all'interno di tipiche sequenze di isola barriera.

Il **cluster 3** raggruppa il numero più elevato di campioni tutti costituiti dai sedimenti a granulometria più fine ($6.37 < Mz < 7.29 \phi$), tipici di ambienti deposizionali a bassa energia. I campioni provengono da siti di barene di margine di canale (G3B, G5B, G7B), da barene isolate (M5B, G6B) poste in prossimità del margine interno della laguna, dalla barena M3B posizionata sul delta endolagunare del Cormor.

Il carattere che accomuna questi siti è la collocazione in ambienti protetti, lontani dalle bocche lagunari, dove le correnti di marea raggiungono valori energetici molto bassi, permettendo così anche al materiale più fine di sedimentare.

All'interno di questo cluster ricadono anche due subcampioni appartenenti alla stazione M7B (retrobarriera); si tratta di due campioni riferiti alla carota più interna delle due (più lontana dalla spiaggia) che completano verso l'alto una sequenza sedimentaria costituita al bottom da sabbie litorali (cluster 2). Il passaggio indica un cambiamento nell'ambiente di sedimentazione. Si passa infatti da

processi di sedimentazione marino-costieri tipici delle isole barriera attive, a un ambiente più protetto (retro-barriera) relegato in seguito allo sviluppo in dimensioni ed elevazione del banco sabbioso originario. La parte retrostante al banco rimane così isolata dai processi costieri e vi diventano dominanti le correnti di marea.

Al **cluster 4** appartengono i subcampioni prelevati nei siti M6B e G4B e solo 1 campione del sito M4B, accomunati da valori di M_z compresi tra 4.58 e 5.17 ϕ . Il primo caso è costituito da un livelli profondi della barena di margine di canale situata lungo uno dei canali appartenenti alla via di navigazione nota come Litoranea Veneta. Quest'area può rappresentare un ambiente deposizionale a energia medio / bassa, poiché si trova abbastanza lontano dalla bocca lagunare, ma situata ai margini di un canale a elevato idrodinamismo testimoniato anche dalla presenza di laminazioni inclinate; uno dei due livelli inoltre mostra segni di rimaneggiamento riconducibile alla movimentazione di materiale per l'escavo del canale. Nel caso di G4B si tratta invece di orizzonti di silt sabbioso che si collocano all'interno di una sequenza di sabbie litorali, a testimoniare fasi di condizioni abbastanza protette tra eventi di *washover* successivi.

Infine nel **cluster 5** ricadono una serie di campioni con $5.75 < M_z < 6.5\phi$ appartenenti alle barene di margine di canale G1B e G2B (i cui campioni ricadono tutti in questo cluster con un'unica eccezione raggruppata nel cluster 3), 2 campioni superficiali di barene di margine di canale site nell'area della Gran Chiusa (G5B2 e G7B2), 1 campione superficiale del sito M6B e 2 campioni superficiali dei siti M7B e M4B. Questi ultimi completano una sequenza sedimentaria costituita al bottom da sabbie litorali (cluster 1 e 2). Il passaggio a granulometrie nettamente più fini (M_z nel campo del silt grossolano) indica un cambiamento nell'ambiente di sedimentazione, analogamente a quanto descritto nel cluster 3.

I subcampioni appartenenti ai siti G1B, G2B invece, si riferiscono a barene di margine di canale in cui gli apporti sedimentari, piuttosto elevati trattandosi di barene in forte espansione, sono legati alle correnti di marea in aree abbastanza interne alla laguna, dove il sedimento viene veicolato dai canali lagunari secondari.

3.4.4 Analisi di facies

In base all'analisi descrittiva delle carote e ai risultati delle analisi granulometriche, è stato possibile individuare alcune facies, attribuibili a differenti ambienti di sedimentazione (Fig. 3.40), di seguito descritti. Le figure 3.42 e 3.43 sintetizzano la ricostruzione stratigrafica e l'identificazione delle facies appena descritte per le carote rispettivamente ricadenti in laguna di Grado e in quella di Marano; in figura 3.41 è riportata la legenda delle simbologie utilizzate.

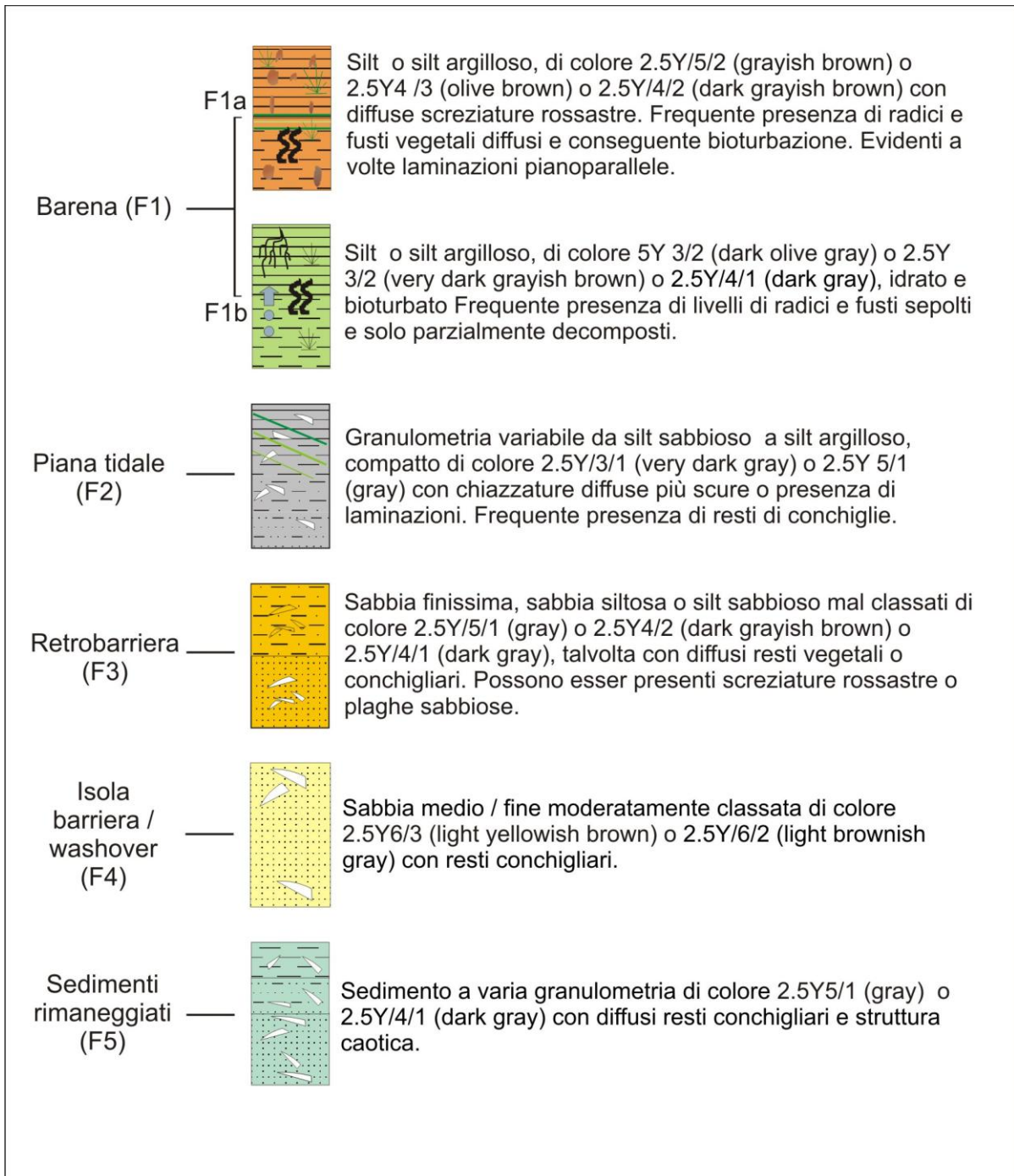


Figura 3.40 - Sintesi delle facies riscontrate nelle carote prelevate.

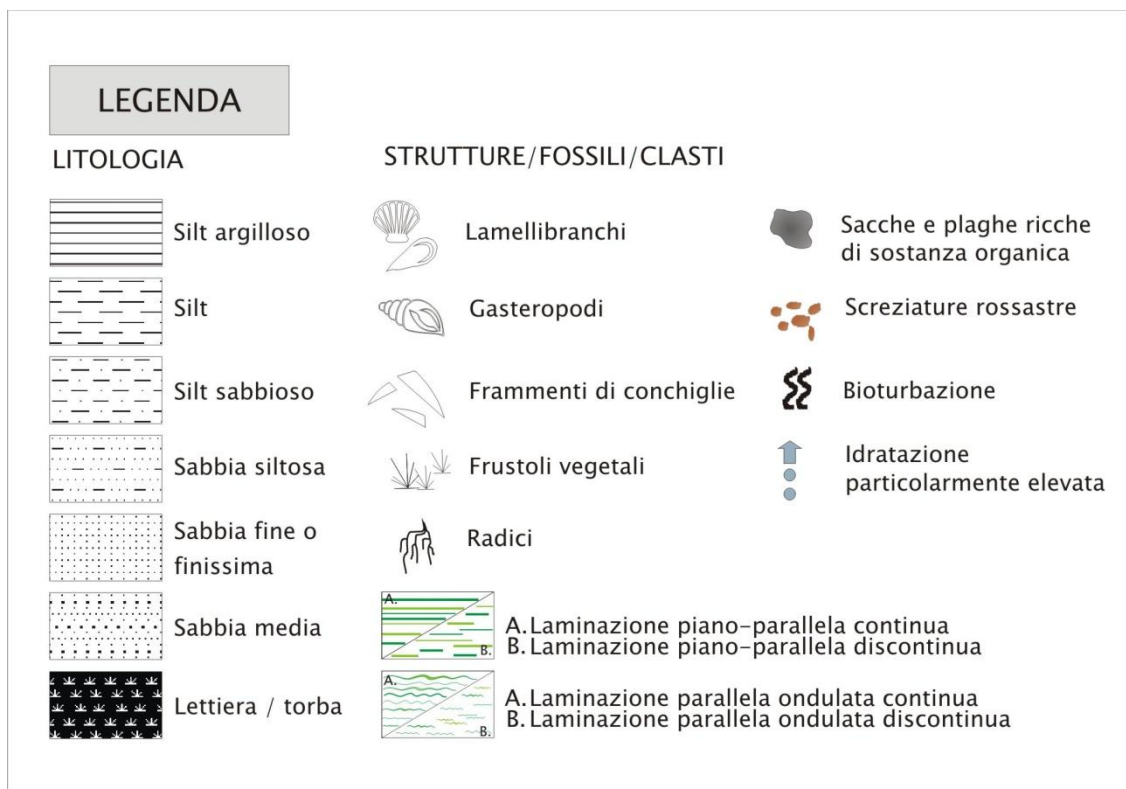


Figura 3.41 - Legenda dei simboli utilizzati per la descrizione delle carote.

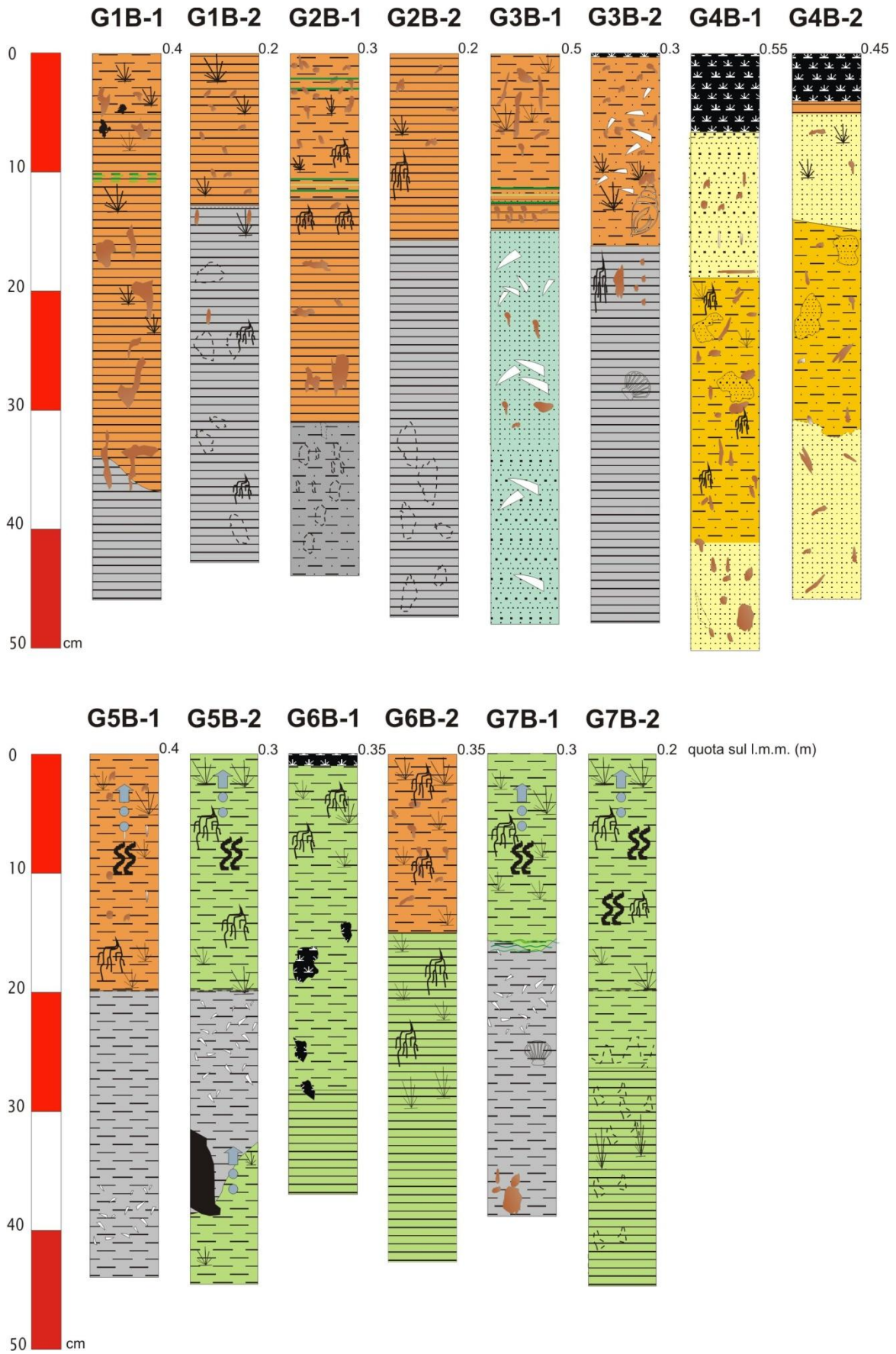


Figura 3.42 – Schema stratigrafico e attribuzione delle facies per le carote prelevate in laguna di Grado (per le legenda delle facies si veda la figura 3.40, per quella dei simboli la figura 3.41).

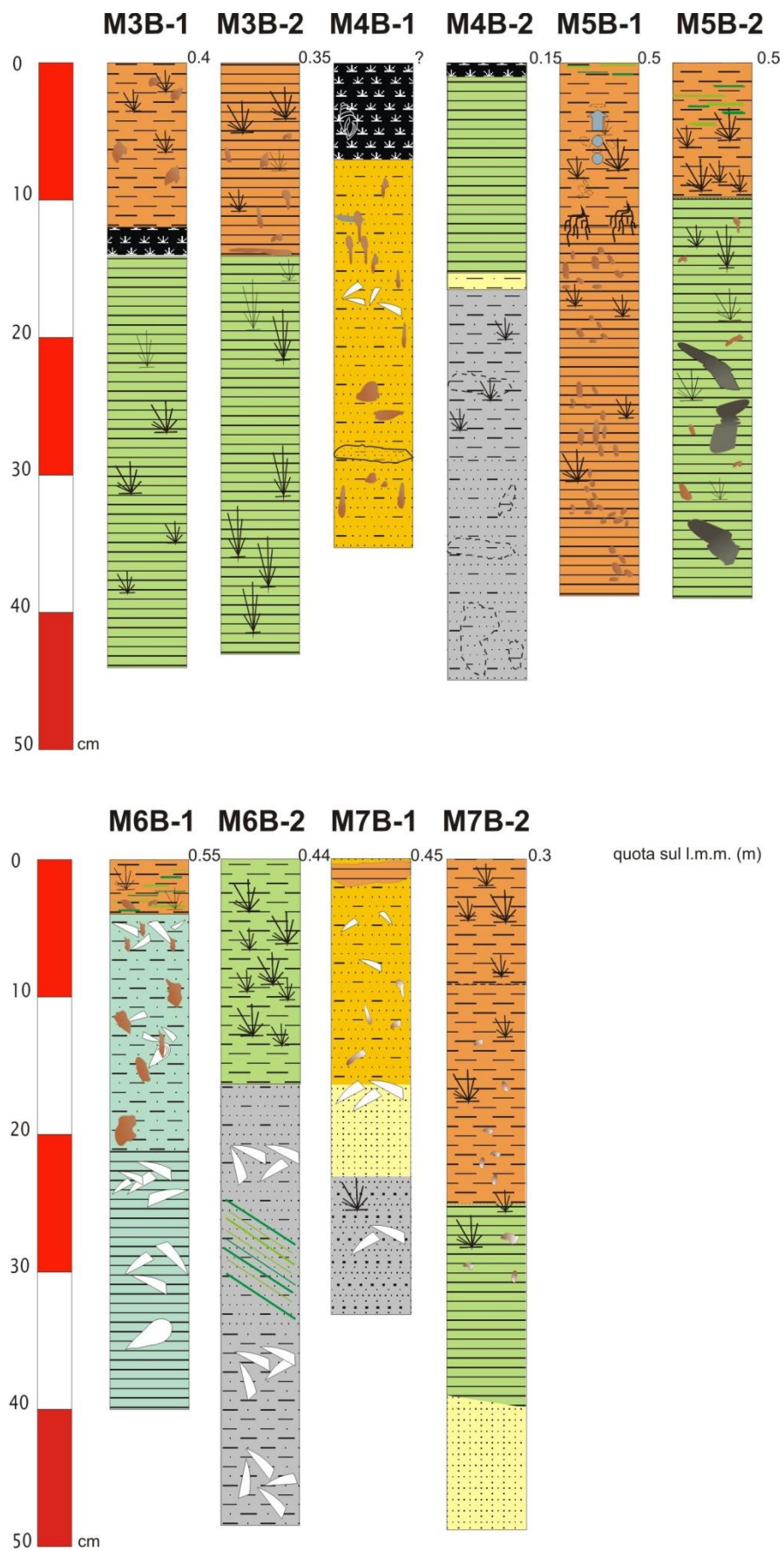


Figura 3.43 – Schema stratigrafico e attribuzione delle facies per le carote prelevate in laguna di Marano (per le legenda delle facies si veda figura 3.40, per quella dei simboli la figura 3.41).

Facies di barena (F1a, F1b)

A questo ambiente sono state attribuite due sub-facies. La prima (F1a indicata nella figura 3.40 col colore arancione) è frequentemente rappresentata al top da un livello a spessore variabile (al massimo 6-7cm), cosituito in prevalenza da sostanza organica di aspetto terroso (humus), cui segue un silt o più raramente un silt argilloso di colore *grayish brown*, *dark grayish brown*, *very dark grayish brown* o *olive brown*, con frequente presenza di residui vegetali sottoforma di frustoli minuti o di intere radici. Sono talvolta presenti laminazioni piano parallele, spesso però obliterate dalla presenza diffusa delle radici; sono invece sempre presenti macchie o screziature rossastre che indicano la formazione di ossidi di ferro e quindi di condizioni ossidanti tipiche di ambienti che non sono saturi di acqua per la maggior parte del tempo (Lang et al., 2006a). La seconda (F1b indicata in figura con il colore verde) è costituita da silt o sil argilloso di colore *very dark grayish brown*, *dark olive gray* o *dark gray* che si presenta completamente privo di strutture evidenti, molto idrato e caratterizzato su tutto lo spessore dalla presenza di resti vegetali (soprattutto radici) disposti in posizione fisiologica. Non sono mai presenti in questa facies le chiazze rossastre riconducibili a fenomeni di ossidazione. Questo indicherebbe condizioni sature d'acqua, scarsa disponibilità di ossigeno e quindi minor frequenza delle sommersioni (Lang et al., 2006b). Infatti i sedimenti posti sotto il livello del mare o sommersi per un lungo periodo sono in genere grigi per l'assenza di ossidi di ferro che sono responsabili della colorazione rossastra dei sedimenti, quando la barena cresce al di sopra del livello medio del mare (Blume & Muller-Thomsen, 2007). Di contro i sedimenti posti sopra il livello di falda ma ancora entro la frangia capillare e quindi solo temporaneamente sommersi, mostrano la presenza di chiazze rossastre, distribuite all'interno di una matrice grigia, dovute a una grande disponibilità localizzata di ossigeno (Fiedler & Sommer, 2004). Solo nei casi che non sono sotto l'influsso delle acque di falda o di acque stagnanti gli ossidi di ferro appaiono distribuiti uniformemente in tutta la matrice sedimentaria.

L'assenza di chiazze rossastre pur in presenza di altre evidenze riconducibili a un ambiente di barena si riscontra effettivamente con una certa frequenza nella porzione inferiore delle carote al di sotto di depositi di tipo F1a (carote M3B-1, M3B-2, G6B-2 e M5B-2, caso quest'ultimo in cui però è associata a rara e minuta presenza di patine di ossidazione). In due casi essa caratterizza invece la parte superficiale della carota con spessori di 15 - 20cm (G5B2, G7B1, M4B-2, M6B-2) oppure l'intero spessore (G6B-1, G7B-2) campionato (si vedano le figure 3.42 e 3.43 per le rispettive quote campagna).

La correlazione tra le quote campagna e la presenza delle screziature rossastre non appare così evidente nei campioni raccolti, anche se è la facies F1a è più frequentemente rinvenibile alle quote maggiori (sopra i 30cm). In effetti una correlazione tra disponibilità di ossigeno e quote della barena (quindi frequenza delle sommersioni) non appare così scontata anche in letteratura (Lang et al., 2010) e la disponibilità di ossigeno nel sedimento deve essere quindi attribuita anche ad altri fattori, in particolare quando differenze di quota molto piccole mostrano disponibilità di ossigeno molto diverse (come

semberebbe nel nostro caso): ad esempio alla capacità drenante dei sedimenti e quindi la loro tessitura (Ursino et al., 2004).

Le descrizioni di facies a barena attuali non sono comuni in letteratura (Bartholdy, 2012). (Dashgard & Gingras, 2005) hanno descritto (in ambiente macrotidale) diverse facies di barena con depositi di silt laminati pianoparalleli o ondulati, di colore variabile dal *greenish gray* a *reddish brown*, caratterizzati dall'estesa presenza di radici lungo tutto lo spessore sedimentario (similmente a quanto da noi riscontrato) di circa 2.5m e intercalati da depositi di silt argilloso di colore *gray* associati al fondo di *salt pan* attuali o sepolti.

Facies di piana tidale (F2)

In questa facies (riportata in colore grigio) sono stati raggruppati intervalli sedimentari tra loro assimilabili per alcuni caratteri, ma che presentano per altri una discreta variabilità. Essi possono essere attribuibili all'ambiente delle piane tidali (velme). I sedimenti associati a questa facies hanno granulometria variabile da silt sabbioso a silt argilloso che si presenta compatto di colore *very dark gray* o *gray*, con frequenti chiazzature di colore più scuro e/o resti conchigliari, più raramente sono presenti laminazioni. L'assenza di chiazzature rossastre, il colore grigio dal frequente aspetto maculato (*mottled*) e la mancanza di livelli con grande concentrazione di resti vegetali sono gli elementi più importanti per attribuire questi sedimenti all'ambiente di piana tidale. L'assenza o la mancata evidenza di laminazioni, che si associa più frequentemente ai livelli più ricchi in fango, è tipica delle facies di piana tidale, in cui la scarsa presenza di sabbie, l'azione di risospensione del sedimento da parte del moto ondoso, unitamente alla forte bioturbazione indotta dagli organismi bentonici (Davis, 2012), non ha consentito la preservazioni di laminazioni tidali.

Facies di retrobarriera (F3)

Sono stati associati a questa facies (in colore giallo scuro) solo 4 livelli costituiti da sabbie fini o finissime e silt sabbiosi di colore *gray*, *dark gray* o *dark grayish brown* caratterizzate da chiazzature rossastre, plaghe maggiormente sabbiose e talvolta con presenza di radici o resti vegetali (G4B). Alcuni di questi elementi fanno attribuire alcuni casi (G4B-1 e G4B-2) a un ambiente di barena instauratosi in un'area protetta alle spalle delle isole barriera, successivamente interessato da un evento di washover (F4), sul quale si è a sua volta reimpostata in tempi più recenti la vegetazione di barena. La granulometria, che presenta comunque contenuti in sabbia molto elevati rispetto alle altre facies di barena riscontrate, va comunque associata a un ambiente caratterizzato da una certa energia. Gli altri due casi riscontrati (M7B-1 e M4B-1) costituiti da sabbia siltosa con frammenti conchigliari, non mostrano invece i caratteri tipici della barena. Queste due facies possono rappresentare un ambiente di retrobarriera prossimo alle isole barriera stesse, dove su precedenti depositi sabbiosi può impostarsi una sedimentazione a prevalente dominio tidale e la formazione di barene (Fig. 3.44).

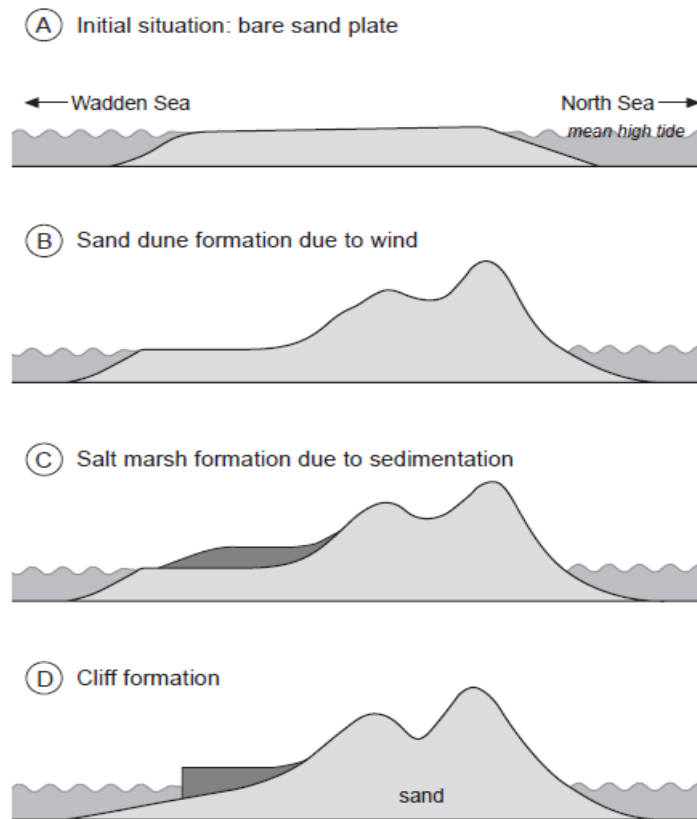


Figura 3.44 – Schema di base riguardante la formazione di un’isola barriera e il successivo sviluppo di una barena sul margine interno; **a**-situazione iniziale: piattaforma a sabbia nuda; **b**-formazione di dune sabbiose ad opera del vento; **c**-formazione di barene per processi di sedimentazione alle spalle dell’isola barriera; **d**-formazione di una scarpata erosiva (da Olff et al., 1997).

Facies di isola barriera (washover) (F4)

Sono stati associati a questa facies (in colore giallo chiaro) 6 livelli costituiti da sabbie medie o fini moderatamente classate di colore *light yellowish brown* o *light brownish gray* con frequente presenza di resti conchigliari talvolta raggruppati in strati orizzontali o in accumuli caotici. Le sabbie si presentano prive di laminazioni o strutture evidenti, ma sono caratterizzate in alcuni casi da superfici inclinate al top.

Questa facies è stata attribuita a depositi di *washover*. Si tratta di eventi deposizionali associati a condizioni meteomarine molto intense che fanno sì che le onde superino l’isola barriera depositando in sedimenti erosi dalla spiaggia sul margine interno. Ne risultano dei corpi sedimentari lobati anche molto estesi, costituiti da livelli di sabbia in lamine di differente spessore ad andamento suborizzontale o a basso angolo, con livelli molto ricchi in conchiglie (Boggs, 2006).

Alle facies finora descritte va aggiunta una quinta facies (F5) definita come *sedimento rimaneggiato*, alla quale sono stati attribuiti due casi: un intervallo sabbioso ricco di frammenti conchigliari privo di strutture evidenti presente nella carota G3B1 al di sotto dell’attuale ambiente di barena, probabilmente

ascrivibile a depositi relitti di non certa attribuzione, molto probabilmente rimaneggiati; un intervallo costituito da silt argilloso evidentemente rimaneggiato con livelli di conchiglie caotici, probabilmente attribuibile alle pratiche di escavo del canale adiacente.

Per ciascuna carota o coppia di carote è stato così possibile ricostruire in prima ipotesi la storia evolutiva del sito nel passato recente. A questo proposito, relativamente alla profondità di indagine (40-50cm) sono disponibili due datazioni eseguite da Covelli et al. (2012) e Petranich (2010) nei siti M5B e G1B utilizzando la misura dell'attività del ^{210}Pb e del ^{137}Cs su campioni analoghi. Esse attribuiscono alla profondità di 63cm un'età di circa 250-260 anni per M5B e di circa 210 anni per G1B.

In alcuni casi non c'è apparente continuità tra due carote di una stessa area campione, ciò è riconducibile alla modalità di campionamento con distanze variabili tra un prelievo e l'altro (da 5 a 40m circa); per le caratteristiche stesse dell'ambiente lagunare queste distanze possono essere significative, in quanto è frequente che stadi evolutivi, processi pedogenetici e condizioni ambientali differiscano in modo abbastanza rilevante anche a distanze molto ravvicinate (Lang et al., 2006).

4 Analisi a macroscala

4.1 Introduzione

Questa parte del lavoro affronta lo studio delle barene a livello di intera laguna, ponendosi come obiettivo la conoscenza degli aspetti morfo-evolutivi su scala temporale estesa (ultimi 60 anni). Il punto di partenza di questa analisi è costituito da una “fotografia” dell’estensione delle barene in tre diversi momenti temporali, ottenuta grazie alla vettorializzazione delle loro superfici sulla base delle foto aeree del 1954, 1990, 2006.

Le variazioni nell’estensione delle superfici a barena interpretate attraverso differenti tipi di analisi in ambiente GIS (confronto complessivo, analisi per gruppi e analisi topologica), unitamente alle evidenze di tipo morfologico, geografico e vegetazionale (ottenute grazie agli studi nelle aree campione descritti al cap.3 e ai dati pregressi già disponibili per la laguna) sono state utilizzate per costruire una casistica morfo-evolutiva, per individuare e quantificare le forzanti responsabili delle variazioni avvenute e proporre infine una prima serie di strategie d’intervento (cap. 5).

I risultati così ottenuti inoltre sono stati utilizzati, grazie alla disponibilità di un inedito dataset relativo all’evoluzione batimetrica dell’intera laguna (per il periodo 1964 e 2009), per una valutazione delle relazioni tra l’evoluzione delle barene e le dinamiche di bacino (stime di bilancio di massa e modificazioni ipsometriche).

Parte integrante del lavoro è costituita da un geodatabase (denominato *DinamicaEvolutivaBarene*) contenente le basi di dati utilizzate per l’analisi delle dinamiche evolutive, che potrà essere facilmente utilizzato ulteriormente per analisi e interrogazioni spaziali e nello stesso tempo interfacciato alla cartografia tematica già disponibile per la laguna. Esso può rappresentare in questo modo un valido strumento di supporto nei processi decisionali e di pianificazione territoriale.

4.2 Strumenti utilizzati

Per analizzare lo stato e le tendenze evolutive delle barene nell’intera laguna di Grado e Marano ne è stata indagata l’evoluzione areale,

La metodologia adottata in ambiente GIS (spiegata al paragrafo 4.3) vede come punto di partenza l’utilizzo delle entità geometriche risultato della digitalizzazione delle sagome delle barene ricavate dalla fotointerpretazione di foto aeree e ortofoto digitali, uniche basi di dati disponibili sufficientemente precise per verificare le tendenze evolutive in atto su una base temporale abbastanza estesa ossia a partire dagli anni ‘50.

Nello specifico, le entità geometriche di tipo poligonale che descrivono forma ed estensione delle barene, sono state organizzate in tre distinti livelli tematici (*feature class*) omogenei dal punto di vista del periodo storico delle foto aeree e ortofoto digitali a cui le attività di fotointerpretazione fanno riferimento:

- **Barene 1954**, tracciate sulla base delle foto aeree del 1954, volo GAI (scala nominale 1:35000). I fotogrammi sono custoditi presso il Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste; l'area di interesse è costituita da 20 fotogrammi in B.N. 23x23cm, che sono stati scannerizzati e georiferiti in ambiente GIS nel sistema di coordinate di riferimento "Gauss-Boaga Fuso EST" sulla base della Carta Tecnica Regionale Numerica della Regione Friuli Venezia Giulia. L'elevata scala nominale, la scarsa nitidezza e la presenza del riflesso del sole, in molti casi hanno reso di difficile interpretazione le superfici a barena (Fig. 4.1). Perciò, a supporto della foto-interpretazione si è utilizzata la cartografia storica fornita dal Centro di Rilievo, Cartografia ed Elaborazione CIRCE dell'Università IUAV di Venezia.

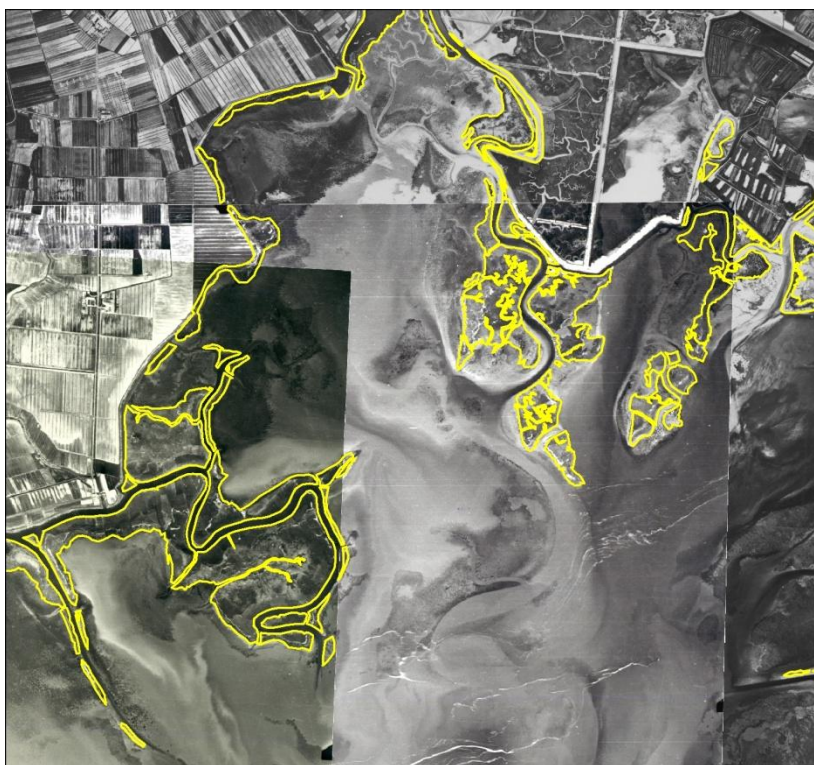


Figura 4.1 - Esempio di fotogramma della levata 1954 con, evidenziati in giallo, i contorni delle barene.

- **Barene 1990**, tracciate sulla base delle foto aeree del 1990: volo CGR lotto 10 Trieste per la redazione della Carta Tecnica Regionale (scala nominale 1:10000) fotogrammi a colori 23x23 cm, per un totale di 134, gentilmente concesse per la consultazione dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Anch'esse sono state scannerizzate e georiferite in ambiente GIS nel

sistema di coordinate di riferimento “Gauss-Boaga Fuso EST” sulla base della Carta Tecnica Regionale Numerica della Regione Friuli Venezia Giulia. Le morfologie di barena risultano evidenti e ben definite dato il buon dettaglio delle foto, la nitidezza e le condizioni meteorologiche favorevoli al momento dell’acquisizione (Fig. 4.2).

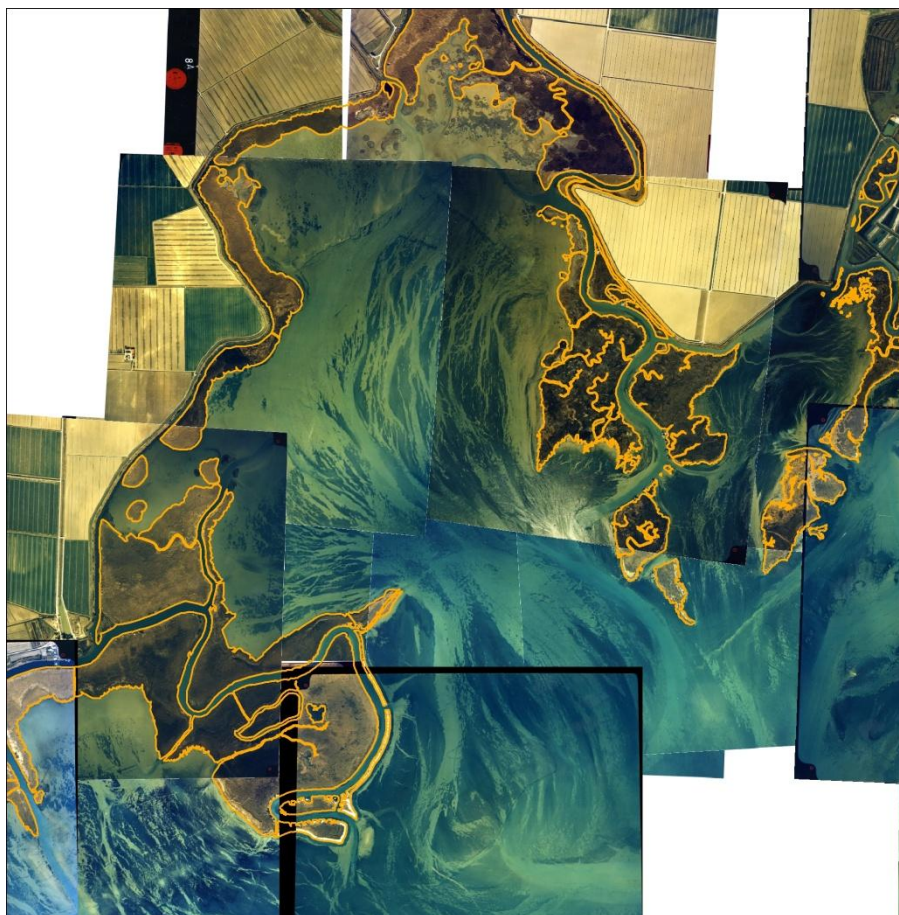


Figura 4.2 - Esempio di fotogramma della levata 1990 con, evidenziati in arancione, i contorni delle barene.

- **Barene 2006**, tracciate sulla base delle ortofoto digitali a colori, volo 2006, disponibili in consultazione presso il Portale Cartografico Nazionale del Ministero dell’Ambiente. Questo volo ha un’ottima risoluzione (0,3m pixel) e consente un buon riconoscimento delle morfologie (Fig. 4.3).

A corredo sono state quindi utilizzate anche le seguenti fonti:

- *Cartografia storica IGM in scala 1:25000*, formato *raster* (georiferita nel sistema di coordinate di riferimento “Gauss-Boaga Fuso EST”): in particolare Foglio 40 III SE della Carta d’Italia 1951 “Lignano Sabbia d’Oro”; Foglio II SO 1949 “Porto Buso”; 40 II SE 1949 “Grado”, tutte, fornite dal Centro di Rilievo, Cartografia ed Elaborazione CIRCE dell’Università IUAV di Venezia.
- *Carta Tecnica Regionale Numerica*, in formato DWG, scala nominale 1:5000, per un totale di 32 sezioni.

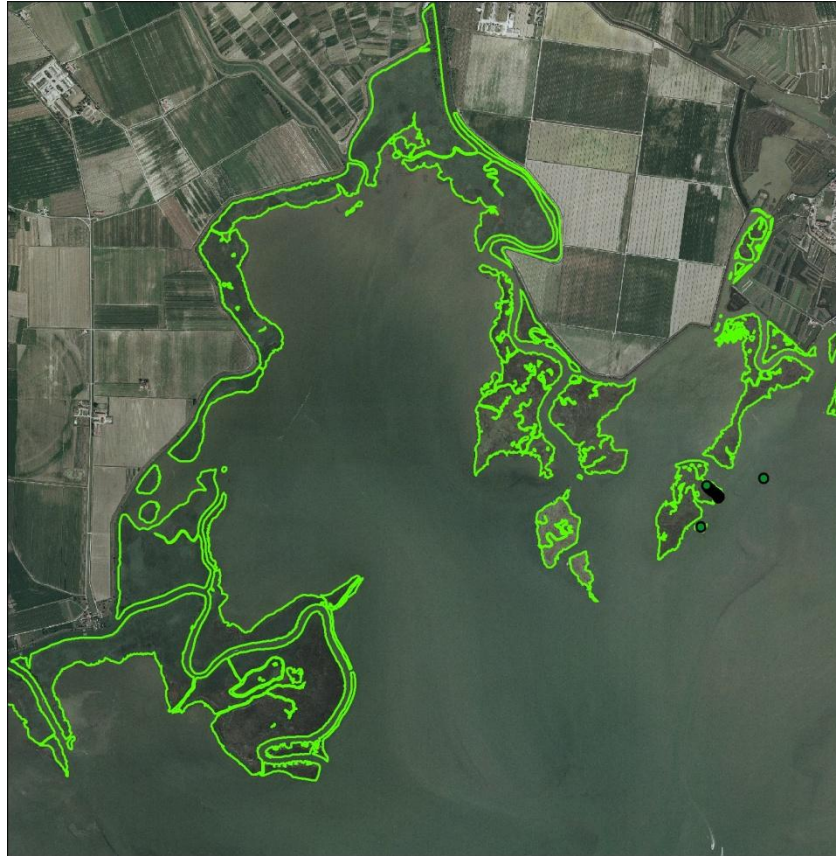


Figura 4.3 - Esempio di fotogramma della levata 2006 con, evidenziati in verde, i contorni delle barene.

- *Carta Idrografica della Laguna di Grado e Marano* (Dorigo, 1966), costituita da 17 tavole in formato cartaceo alla scala 1:10.000, riportanti i valori delle batimetrie riferibili a una serie di campagne idrografiche condotte tra il 1938 e il 1964 dall'Ufficio idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia sotto la direzione dell'ing. Livio Dorigo. La digitalizzazione di questa carta è stata effettuata dalla ora non più esistente Autorità di Bacino Regionale del Friuli Venezia Giulia ed è stata messa a disposizione nell'ambito di una collaborazione di ricerca con il Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste.
- *Carta batimetrica della Laguna di Marano e Grado* (Triches et al., 2011), disponibile in formato sia cartaceo che digitale, i cui dati batimetrici risalgono al 2009.
- *Cartografia degli habitat della Laguna di Grado e Marano* (Poldini et al., 2006) disponibile in formato shapefile.
- *Carta Geologico Tecnica della Regione Friuli Venezia Giulia (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione Centrale Ambiente e Lavori Pubblici, Servizio Geologico, 2008).*

4.3 Metodi di analisi

A partire dalla digitalizzazione delle sagome delle barene individuate mediante fotointerpretazione, (Fig. 4.4) si è potuto analizzarne l'evoluzione in termini di variazione areale nei due intervalli di tempo 1954-1990 e 1990-2006 e il quello totale, in primo luogo come confronto di aree complessive.

La variazione complessiva avvenuta è però il risultato della somma algebrica di una serie di modificazioni più o meno grandi e di segno opposto: perdite e guadagni avvenuti a scala più piccola, a livello di gruppo di barene, ma anche di singola barena. È proprio su questi fenomeni che si è concentrata la nostra analisi, per poter poi meglio interpretare il fenomeno a vasta scala, ossia di bacino e di intera laguna.

Le differenti tipologie di analisi effettuate sono descritte brevemente di seguito, mentre i risultati saranno poi discussi nei paragrafi 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8.

In una prima fase del progetto era stata adottata la sola metodologia dell'analisi per gruppi e i risultati ottenuti sono stati oggetto della pubblicazione Fontolan et al. (2012). Successivamente è stata affiancata una metodologia di analisi più sofisticata in ambiente GIS (analisi topologica), grazie alla quale l'intero dataset è stato completamente rivisto, integrato e corretto. L'analisi per gruppi è stata comunque mantenuta come vedremo al paragrafo 4.3.1 per il suo significato gestionale, ma sono state applicate anche a essa delle integrazioni anche modificando la scelta dei gruppi, ad esempio creando una maggior suddivisione laddove si è ritenuto necessario.

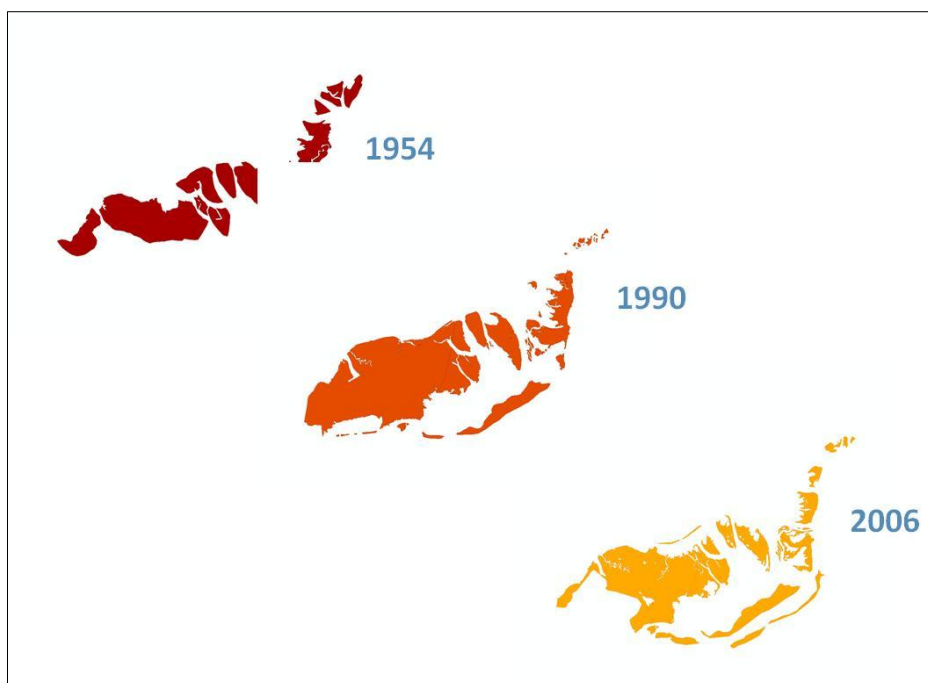


Figura 4.4 – Esempio di digitalizzazione della sagome di un gruppo di barene per le tre annate considerate.

4.3.1 Analisi per gruppi

Le dimensioni dei singoli corpi di barena sono molto variabili e in alcuni casi piuttosto ridotte, inoltre nell'arco temporale considerato le modificazioni sono state anche di rilevante entità (anche a causa di pesanti interventi antropici come vedremo meglio in seguito). Non è sempre quindi possibile o comunque agevole seguire le modificazioni avvenute a livello di singola barena.

A partire dallo stato di fatto nel 2006 quindi 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 gruppo.

In totale sono stati individuati 103 gruppi, la cui distribuzione è riportata in figura 4.5. Essi sono stati identificati con una lettera (che indica il nome del bacino) e un numero progressivo in particolare: L per il bacino di Lignano (23 gruppi), S per quello di S. Andrea (2 gruppi), B per il bacino di Buso (25 gruppi), M per quello di Morgo (9 gruppi), G per quello di Grado (26 gruppi) e infine P per il bacino di Primero (12 gruppi).

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, ossia 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 e offre un buon strumento di pianificazione a livello gestionale.

Si ottiene così una prima quantificazione delle forzanti e dei processi in atto (secondo la classificazione delle tipologie erosivo - accrescitive descritte di seguito) attribuendo alla variazione di superficie complessiva di ogni gruppo una forzante prevalente.

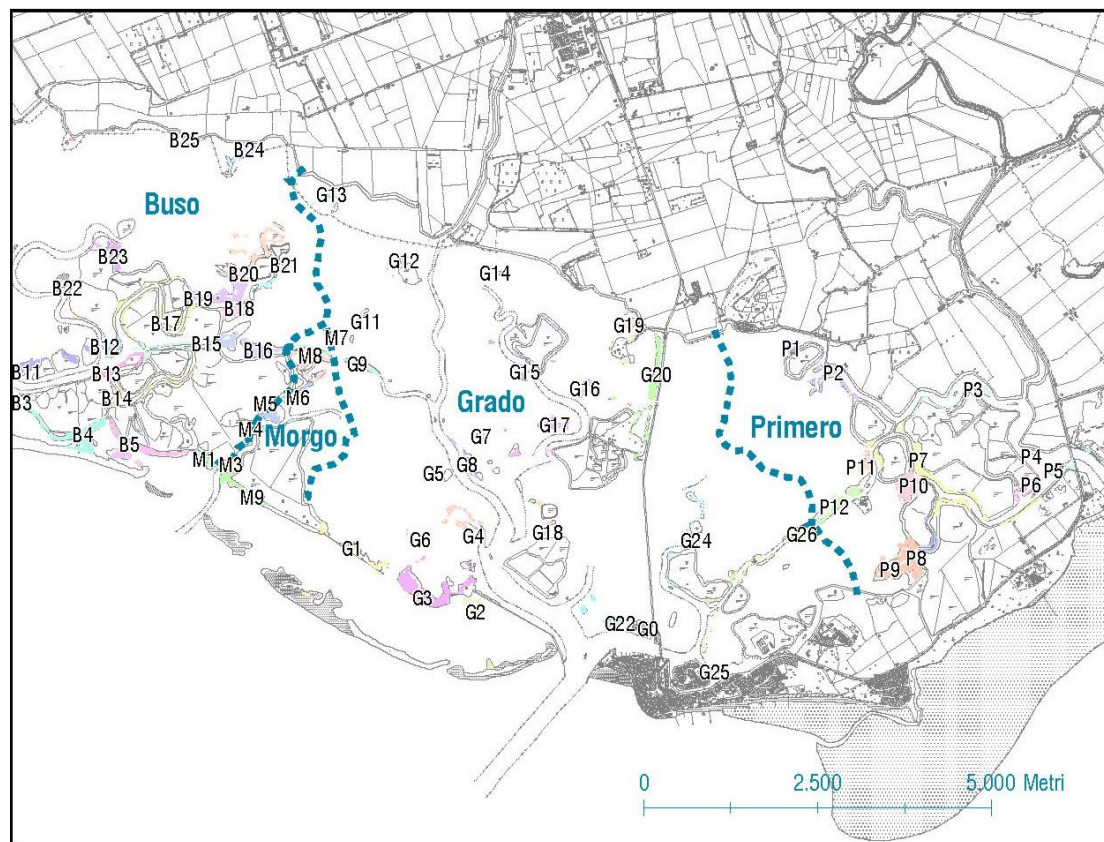
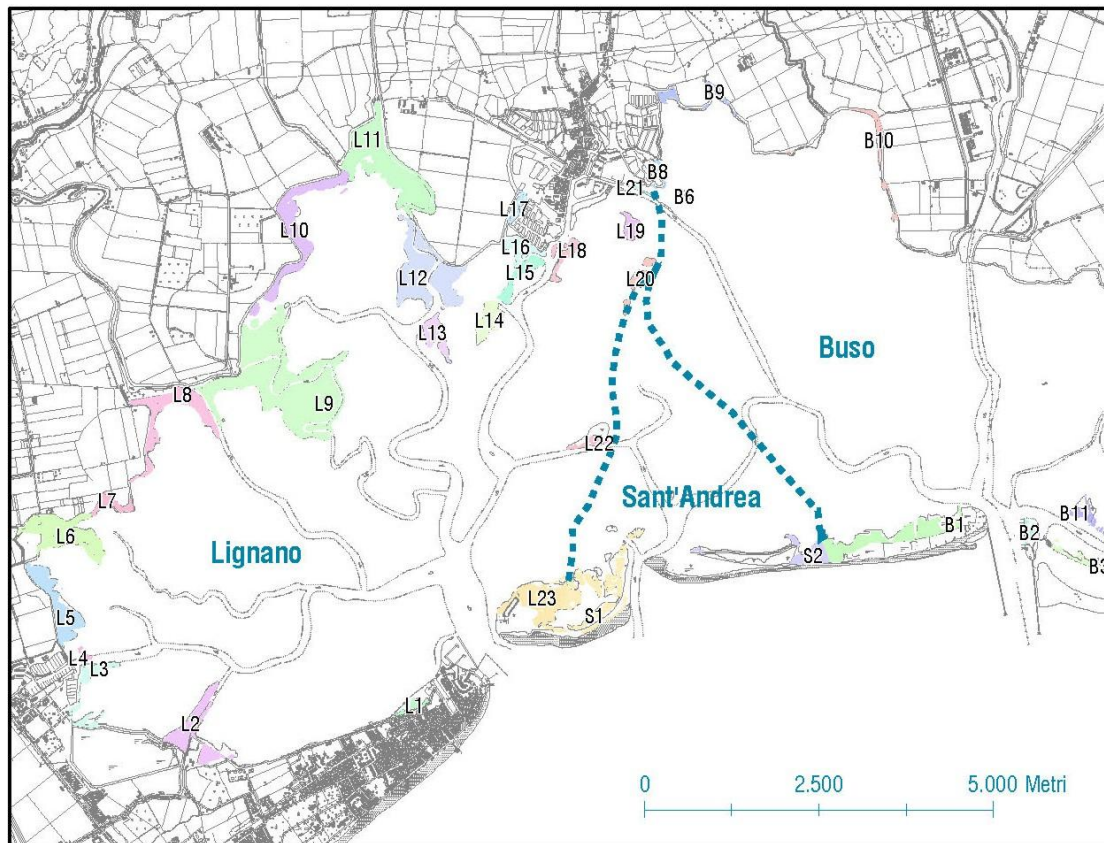


Figura 4.5 – Distribuzione dei 103 gruppi individuati a partire dalla digitalizzazione dei contorni delle barene riferiti all'anno 2006.

4.3.2 Analisi topologica delle superfici e dei margini

Successivamente, per un'analisi approfondita delle modificazioni avvenute nell'arco di tempo considerato, si è utilizzato un metodo di analisi topologica dei dati spaziali in ambiente GIS che ha permesso di evidenziare, per ciascuna barena, le aree rimaste stabili nel tempo, quelle erose e quelle accresciute (Fig. 4.6). L'analisi topologica ha come oggetto di studio le relazioni reciproche esistenti tra le entità geometriche presenti in un determinato livello tematico (analisi di tipo "orizzontale") o su più livelli tematici (analisi di tipo "verticale"). Tali analisi mirano a evidenziare i rapporti di connessione, adiacenza, inclusione, continuità, intersezione o incidenza esistenti tra i diversi elementi spaziali.

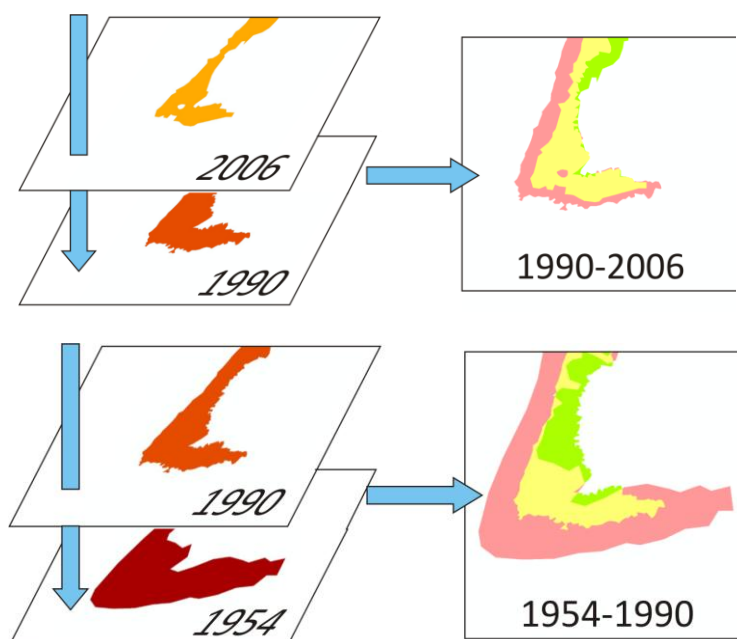


Figura 4.6 – Esempio di *overlay* topologico tra superfici di barene nelle tre annate messe a confronto. A destra è visibile il risultato con l'individuazione delle aree stabili (in giallo), di quelle erose (in rosso) e di quelle accresciute (in verde).

Si è ottenuta così una dettagliata cartografia in GIS per i due intervalli di tempo considerati, che permette di identificare con facilità la contemporanea presenza di fenomeni accrescitivi ed erosivi, a ciascuno dei quali associare una forzante, come dettagliato al paragrafo 4.5.

In secondo luogo analizzando le relazioni topologiche esistenti tra poligoni adiacenti e archi comuni (che rappresentano rispettivamente le porzioni di barena e i margini), è stato possibile individuare i margini di barena sui quali agiscono le forzanti e che costituiscono quindi di fatto dei fronti di avanzamento o di arretramento (Fig. 4.7).

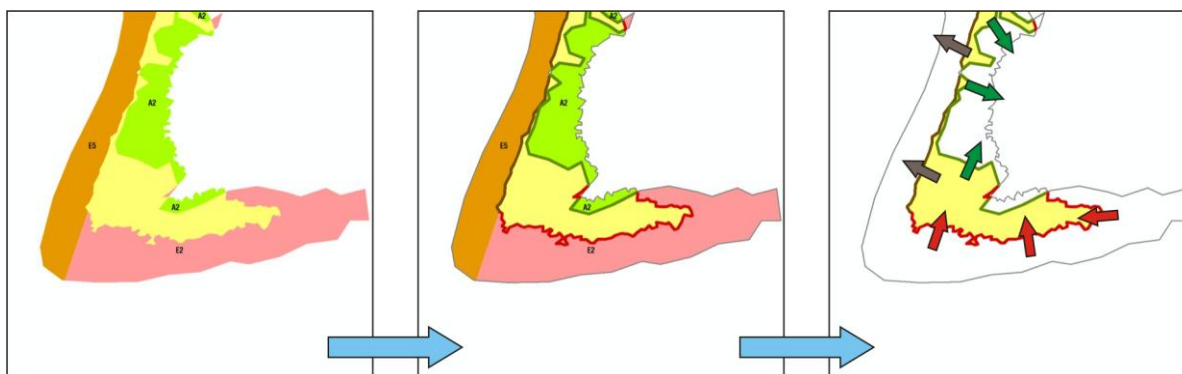


Figura 4.7 – Esempio di analisi topologica realizzata sui margini delle barene per l’individuazione dei fronti di avanzamento e arretramento.

4.3.3 Il geodatabase

Le basi di dati utilizzate per l’analisi delle dinamiche evolutive delle barene e la relativa rappresentazione cartografica, sono state strutturate all’interno di un apposito geodatabase, costruito in *ArcGis Esri*.

Nello specifico, all’interno del geodatabase denominato “DinamicaEvolutivaBarene.mdb”, sono stati creati tre distinti *feature dataset* (denominati “Barene”, “Evoluzione” e “Indagini”) che organizzano al loro interno (in modo coerente dal punto di vista dei contenuti) le varie *feature class*.

In particolare (cfr. schema di figura 4.8):

- **“Barene”** comprende la sagoma delle barene digitalizzata con riferimento agli anni 1954, 1990 e 2006.
- **“Evoluzione”** raggruppa le *feature class* utilizzate per l’analisi e la rappresentazione delle dinamiche evolutive a livello di barene e gruppi di barene (superfici e margini) negli intervalli temporali 1954-1990 e 1990-2006 in particolare:
 - “Superfici” contiene le entità geometriche di tipo poligonale che descrivono le barene o porzioni di barena e le forzanti che su di essi agiscono, nei due intervalli di tempo (1954-1990 e 1990-2006). Tale livello è stato generato tramite *overlay* topologico tra le *feature class* “Superfici_1954”, “Superfici_1990” e “Superfici_1990” .
 - “Margini” contiene le entità geometriche di tipo lineare che descrivono i margini di barena e le forzanti che su di essi agiscono, nei due intervalli di tempo 1954-1990 e 1990-2006 e i margini tra porzioni di barena che si sono modificate nel medesimo intervallo di tempo. Tali margini sono derivati da una serie di analisi topologiche eseguite a livello di perimetro e di superficie delle barene nel 1954, 1990, 2006 e sul relativo confronto.
- **“Indagini”** raggruppa le *feature class* relative ai rilievi topografici delle sezioni delle barene (punti quotati) e alla localizzazione dei punti di prelievo delle carote di sedimento.

- “**Sintesi gruppi**” è una tabella di sintesi dei principali indicatori utilizzati per il calcolo del bilancio evolutivo a livello di gruppi di barene: variazione di superfici nei due intervalli di tempo (1954-1990 e 1990-2006) e per l’intervallo di tempo complessivo (1954-2006) e le forzanti prevalenti attribuite a queste variazioni.

DinamicaEvolutivaBarene.mdb

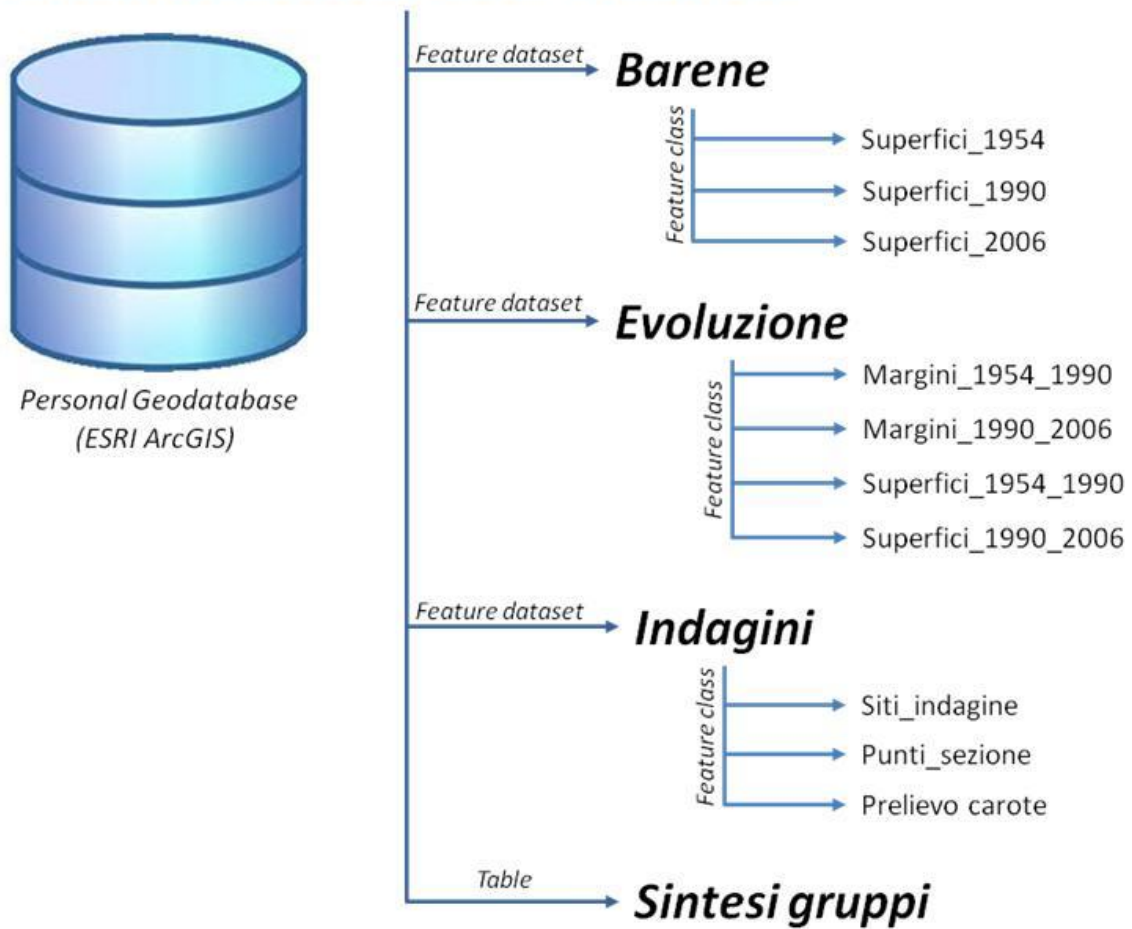


Figura 4.8 – Schema riassuntivo della struttura del geodatabase.

4.3.4 Bilanci di bacino

Con lo scopo di confrontare e mettere in relazione l'andamento evolutivo delle barene con quello più complesso dell'intera laguna sono stati presi in considerazione i dati elaborati 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 Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste coordinato dal prof. Giorgio Fontolan. I dati che verranno qui analizzati (bilanci volumetrici e conformazioni ipsometriche dei fondali lagunari nel 1964 e nel 2009) derivano dal confronto tra le uniche due levate batimetriche esistenti per l'intera laguna, già citate al paragrafo 4.2: la *Carta Idrografica della laguna di Grado e Marano* del 1964 (Dorigo, 1966) e la *recente Carta Batimetrica della Laguna di Marano e Grado* (Triches et al., 2011).

Secondo una metodologia già utilizzata in Sarretta et al. (2010) per ciascuna levata batimetrica sono stati creati i rispettivi modelli batimetrici tridimensionali in *ArcGIS Esri* attraverso lo strumento *3D Analyst* utilizzando una *maglia di triangolazione irregolare (Triangulated Irregular Network, TIN)*. A partire da essi sono stati ottenuti dei raster a maglia 10m dai quali ricavare la statistica della distribuzione delle profondità (ipsometria) e il confronto tra le due annate in termini di bilancio volumetrico, sia complessivo che parziale, su vari intervalli di profondità. L'area analizzata comprende le barene ma esclude dal computo le isole, le isole barriera i banchi e le valli da pesca.

Per confrontare le due mappe non sono state necessarie correzioni relativamente alle quote riportate, in quanto entrambe sono riferite al *Livello medio mare di Genova IGM 42*.

4.4 Distribuzione e classificazione delle barene

L'analisi delle foto aeree del 2006 ha permesso di identificare e perimetrare 760ha di superfici a barena. Basandosi sulla loro distribuzione geografica, sui dati raccolti nelle aree campione e sulle precedenti descrizioni di Brambati (1970) e Gatto & Marocco (1992) e considerando un modello morfogenetico simile a quello proposto da Oertel & Woo (1994), sono state identificate differenti tipologie di barene, diversamente diffuse nei vari bacini (Figure 4.9 e 4.10), di seguito descritte, anche nei loro aspetti sedimentologici. I dati di vegetazione sono tratti da Poldini et al. (2006).

Barene di margine lagunare e delta endolagunare (456ha)

Bordano il margine interno della laguna, quasi esclusivamente nel bacino di Lignano (444 ha) 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

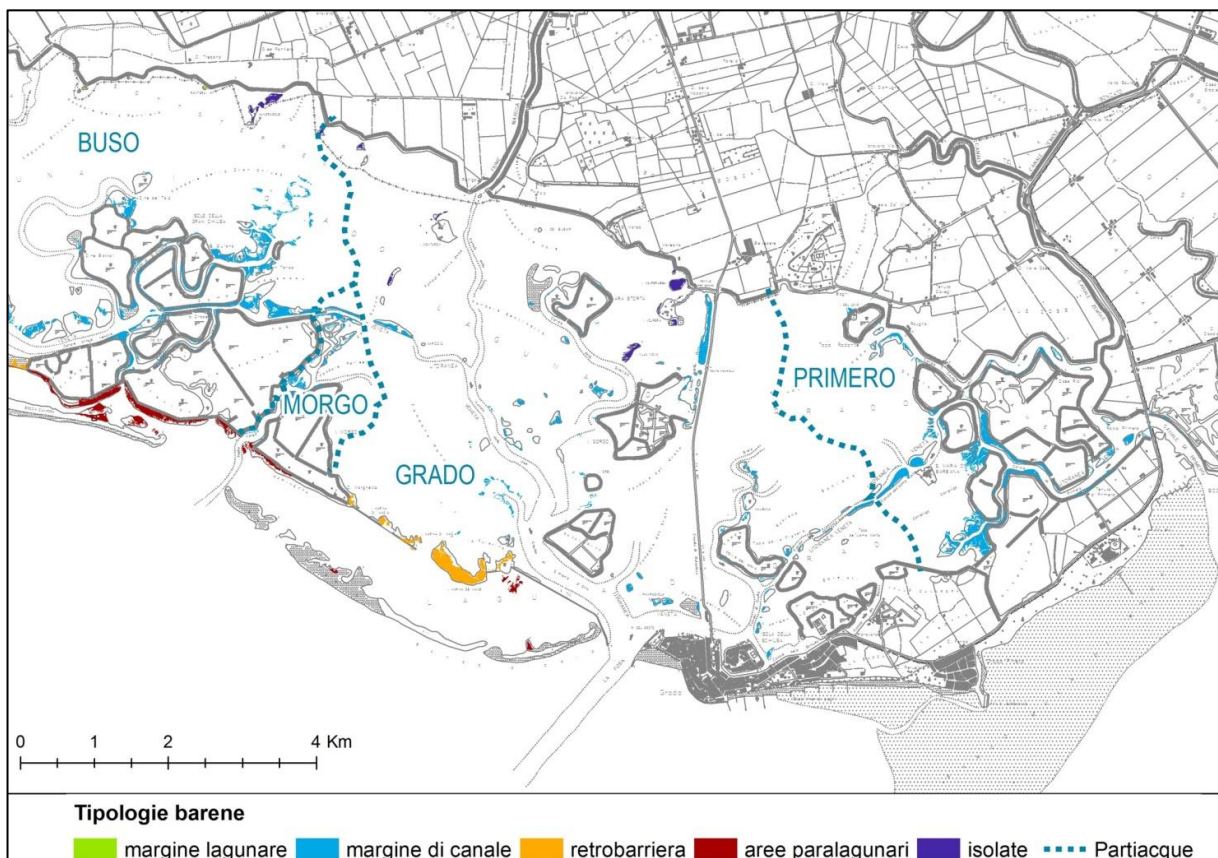
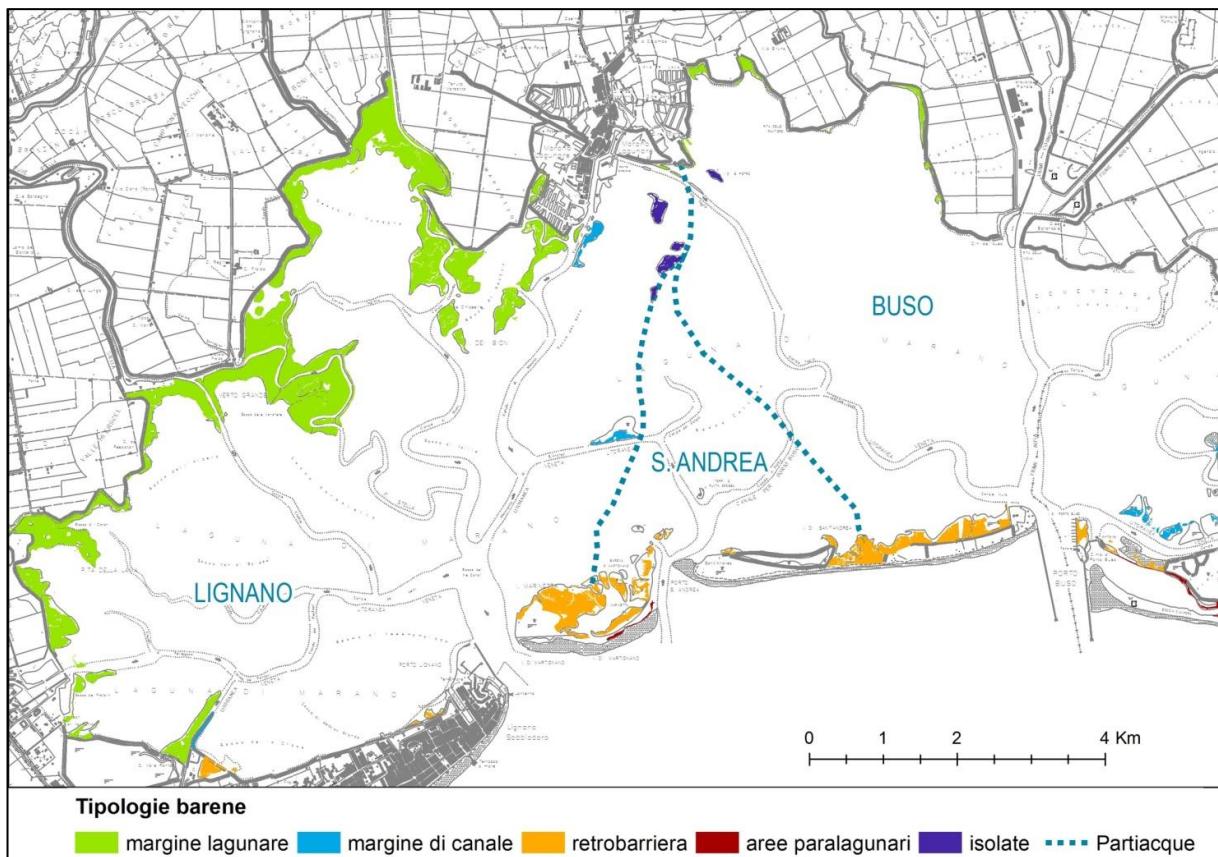


Figura 4.8 – Distribuzione delle diverse tipologie di barene individuate.

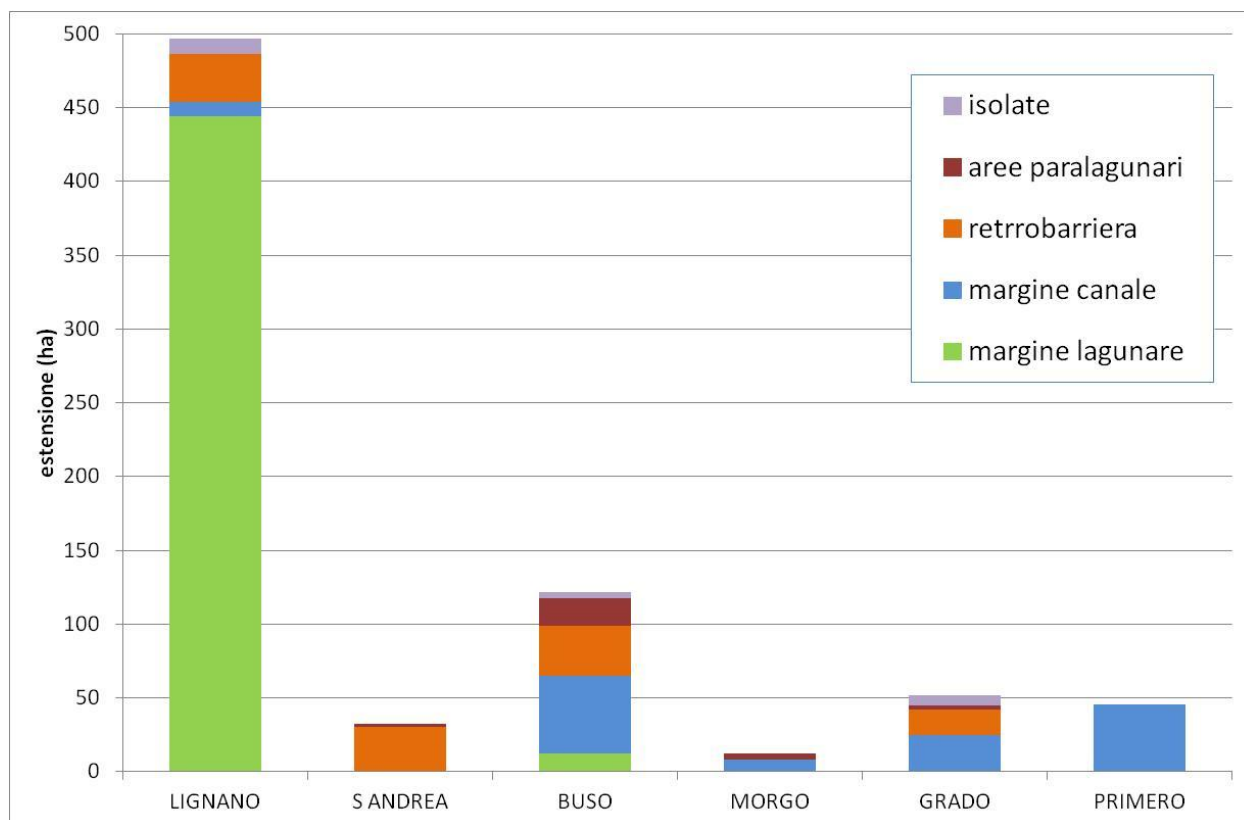


Figura 4.9 – Estensione delle diverse tipologie di barene individuate suddivisa per bacino.

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 (“Vegetazioni elofitiche d'acqua dolce dominate da *Phragmites australis*”, “Vegetazioni elofitiche d'acque salmastre dominate da *Phragmites australis*”, “Vegetazioni delle acque stagnanti salmastre a *Scirpus maritimus*”) e solo nelle aree più lontane dagli sbocchi fluviali “Praterie su suoli salmastri dominate da grandi giunchi”. La dominanza del fragmiteto è in genere accompagnata da una struttura tabulare piuttosto monotona, con scarsa presenza di morfologie tidali evidenti (area campione M1B) 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 (aree campione M2B e M3B). Dal punto di vista sedimentologico il campionamento si è limitato a questo ultimo caso, riscontrando la costante presenza di materiale fine ($6.5 < M_z < 7\phi$), tipica di un ambiente a bassa energia, dove gli apporti sono scarsi e le condizioni di sedimentazione non sembrano aver subito modificazioni significative per l'intero spessore considerato (circa 45cm).

Barene di margine di canale (142ha)

Già identificate a Venezia da Albani et al. (1984) e in laguna di Grado da Gatto e 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 meandriiforme. I margini sul lato del canale sono spesso leggermente sopraelevati, mentre la barena alle spalle tende a digradare dolcemente verso i fondali a velma. Seconde in termini di estensione, queste barene sono diffuse in maniera abbastanza uniforme in tutti i bacini, con l'eccezione del bacino di Lignano e S.Andrea. Raggiungono le estensioni maggiori nel bacino di Buso con 53ha e in quello di Primero con 46ha, entrambi bacini con elevata presenza di valli da pesca tuttora arginate o residui di aree vallive dismesse (aree campione G5B, G7B, G2B). Dal punto di vista morfologico si distinguono alcuni apparati di barene presenti nel bacino di Primero nelle zone in cui le acque della marea montante, prima incanalate tra gli argini delle valli da pesca, si espandono liberamente su un'area a basso fondale. Questi apparati infatti assumono una disposizione a ventaglio incisa da canali secondari che si dipartono da quello principale verso l'area di velma (area campione G1B e in parte G2B).

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 (aree campione M6B e G3B). 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.

Gli habitat presenti sulle barene di margine di canale sono “Praterie su suolo limoso- sabbiosi salati e perennemente inondati a *Spartina maritima*”, “Praterie su suoli da salati a salmastri dominate da *Puccinellia festuciformis*”, “Vegetazione su suoli salati a suffrutici succulenti”, “Praterie su suoli salmastri dominate da grandi giunchi”.

La sedimentologia mostra una certa variabilità per queste tipologie di barena, in relazione a una analoga variabilità morfologica e alla differente collocazione entro il bacino lagunare. Tutti i campioni identificati come facies di barena si suddividono tra due cluster (3 e 5) che sono comunque caratterizzati dalle granulometrie più fini. In particolare G3, G5 e G7 ricadono nel cluster 3 con Mz compreso tra 6.37 e 7.29 ϕ e presentano quasi sempre caratteristiche costanti per tutto lo spessore indagato, a testimonianza di un ambiente di sedimentazione protetto che non ha modificato le sue caratteristiche, nonostante in alcuni casi si verifichi il passaggio da piana tidale a barena.

I campioni relativi ai siti G1B, G2B, uniche barene che afferiscono al bacino di Primero, ricadono interamente nel cluster 5 con granulometrie leggermente più grossolane (Mz compreso tra 5.75 e 6.5 ϕ) e costanti per l'intero spessore indagato, in un'area di elevati apporti sedimentari trattandosi di barene in espansione. Il passaggio tra facies di piana tidale facies di barena mostra solo lievi differenze nelle

curve di distribuzione granulometrica, che non sono risultate significative all'analisi statistica. A questo stesso cluster appartengono anche i campioni superficiali (facies di barena) del sito M6B collocato a lato di un canale ad elevato idrodinamismo.

Barene di retrobarriera (114ha)

Sono presenti alle spalle delle isole barriera di Martignano e S. Andrea, nei bacini di Lignano, S. Andrea e Buso, e Marina di Macia e Manzi in quello di Grado. Sono tipicamente associate alle aree di bassa piattaforma di *overwash* (aree campione M7B e G4B) o in corrispondenza di aree depresse limitate da *beach ridges* ascrivibili a morfologie relitte di bocca tidale o *washover fan* (G4B). Queste barene 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. Gli habitat presenti sono "Praterie su suoli salmastri dominate da grandi giunchi", "Vegetazione su suoli salati a suffrutici succulenti" e "Praterie su suoli da salati a salmastri dominate da *Puccinellia festuciformis*", nelle aree di raccordo con la velma a quote prossime al medio mare sono presenti in alcuni siti anche "Praterie su suoli limoso-sabbiosi salati e perennemente inondati a *Spartina maritima*".

Dal punto di vista sedimentologico si evidenzia la presenza di livelli sedimentari nettamente distinti attribuibili a differenti ambienti di sedimentazione. Al bottom delle sequenze sono infatti evidenti sedimenti tipici di ambienti deposizionali legati ai processi costieri che sono responsabili della costruzione e dell'evoluzione delle isole barriera, in particolare processi di *washover* (cluster 1 con Mz compreso tra 1.97 e 2.23 ϕ , talvolta intercalati da facies tipiche di condizioni più protette con evidenze di ambiente barenicolo (cluster 2 con Mz compreso tra 3.11 e 4.02 ϕ). Al termine della sequenza è spesso rinvenibile un livello di sedimenti più fini, attribuibili all'instaurarsi di una sedimentazione tipica dell'ambiente di barena e del tutto simili dal punto di vista granulometrico e della facies a quelli descritti per le barene di margine di canale.

Barene in bacini paralagunari di recente formazione (27ha)

Si sono formate 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, gli habitat presenti sono "vegetazione su suoli salati a suffrutici succulenti", "praterie su suoli salmastri dominati da grandi giunchi", "praterie su suolo limoso- sabbiosi salati e perennemente inondati a *Spartina maritima*".

Barene isolate (21ha)

Sono state raggruppate in questa categoria le aree a barena che si presentano senza relazione evidente con altre morfologie lagunari attuali (aree campione M5B e G6B) 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 meandriformi e chiari di origine secondaria. Gli habitat che vi si riscontrano sono “praterie su suoli salmastri dominati da grandi giunchi” e “vegetazione su suoli salati a suffrutici succulenti”. I sedimenti dei due casi analizzati (M5B e G6B) mostrano entrambi per l'intera sequenza la presenza di sedimenti fini (Mz compreso tra 6.51 e 7.29φ), attribuibili alla facies di barena.

4.5 Individuazione di differenti tipologie morfoevolutive

A ciascuna delle aree identificate, grazie all'analisi topologica, come soggetta a variazione nel tempo (accrescimento o erosione) e ai relativi margini, è stata attribuita una tipologia di stile evolutivo riconducibile all'azione di una forzante.

Tale attribuzione è stata effettuata sulla base dei seguenti elementi desumibili dai dati a disposizione:

- Evidenze morfologiche 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 il *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).

La classificazione in differenti tipologie erosivo - accrescitive adottata consta di 10 tipologie, 5 delle quali erosive (denominate E1, E2, E3, E4, E5) e 5 accrescitive (denominate A1, A2, A3, A4, A5), che verranno di seguito descritte. I processi erosivi e deposizionali vanno qui intesi nel senso di modificazioni areali (guadagno e perdita di superfici) e non come variazioni di quota per le quali non esistono dati a disposizione.

Erosione delle barene per annegamento (E1)

Il processo erosivo delle barene può essere in molti casi imputato a uno squilibrio tra eustatismo, subsidenza regionale e auto-compattazione in presenza di scarsa sedimentazione (Cahoon et al, 1995; Allen, 2000). Questo si traduce in un processo di annegamento localizzato o esteso, le cui principali evidenze morfologiche sono: arretramento dei margini sul lato di raccordo con la velma senza che vi sia evidenza di una scarpata erosiva, formazione di aree depresse nelle aree più interne, ampliamento di ghebi e chiari, ma anche arretramento dei margini con presenza di scarpate erosive non chiaramente attribuibili ad altre forzanti (Fig. 4.10).

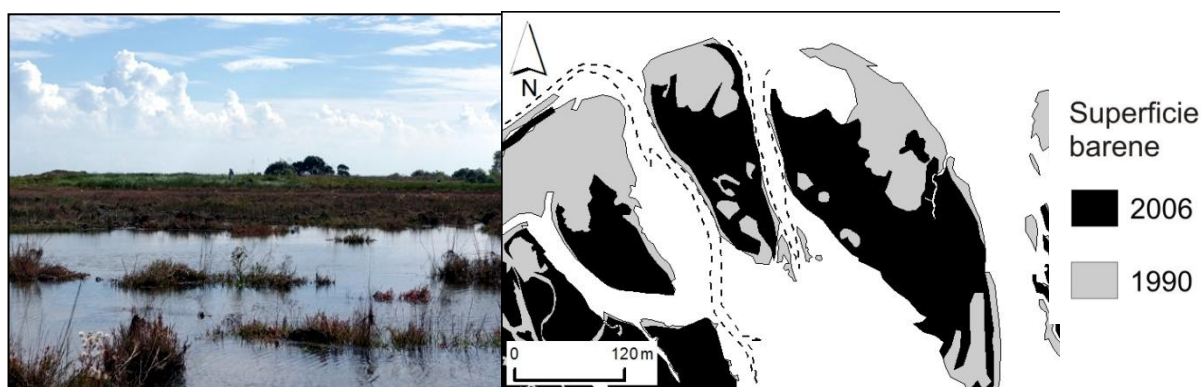


Figura 4.10 – Esempio di barene in cui è stata identificata la tipologia erosiva E1.

Erosione delle barene causata da moto ondoso generato da vento (E2)

L'azione del moto ondoso generato dal vento è una tipica forzante erosiva soprattutto nelle lagune aperte (Cavaleri, 1980; Arfi et al., 1993; Defina et al., 2007; Fagherazzi et al., 2006, 2007). Nelle laguna di Grado e Marano il fetch è ampio soprattutto nei confronti dei venti da ENE (bora), che sono anche quelli dominanti nell'area. Particolarmente esposti all'azione di queste onde sono i bacini di Lignano e Porto Buso e in misura minore alcune parti del bacino di Grado.

L'erosione si manifesta sul lato esposto all'ondazione delle barene con 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 (*spurs and furrows* identificati da Allen, 1993). Il risultato nel tempo è un arretramento progressivo del margine della barena e, nei casi più rilevanti, la sua frammentazione e la scomparsa progressiva dei corpi di minori dimensioni (Day et al. 1998; Baily & Pearson, 2007).

Come osservato da Reed (1988), Day et al. (1998) e Rizzetto & Tosi (2011) in alcuni casi il sedimento eroso dal margine può essere rideposto in altre parti della barena stessa, colmando le aree più protette o i ghebi (Fig. 4.11).

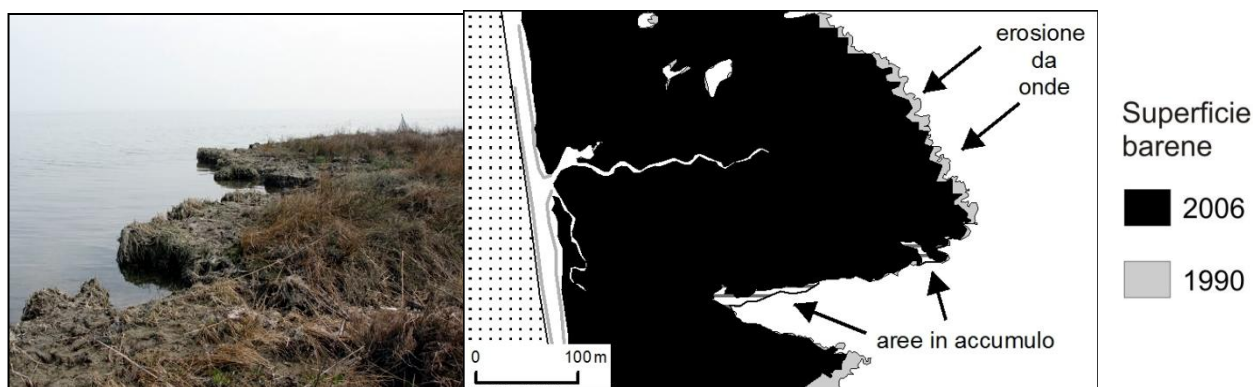


Figura 4.11 – Esempio di barene in cui è stata identificata la tipologia erosiva E2.

Erosione delle barene causata da moto ondoso da natanti (E3)

Il moto ondoso generato dai natanti è frequentemente indicato come una delle cause di erosione dei margini delle barene soprattutto se il traffico è frequente (Castillo et al., 2000), come in laguna di Venezia (Amos et al., 2010).

Esso si manifesta sulle 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. 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 (Fig. 4.12).

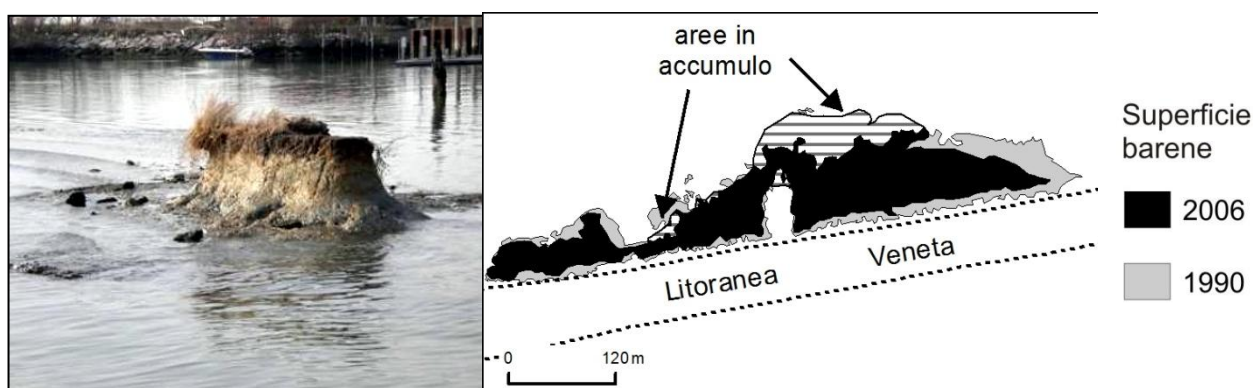


Figura 4.12 – Esempio di barene in cui è stata identificata la tipologia erosiva E3.

Erosione delle barene causata da processi di dinamica costiera (E4)

I processi legati alla dinamica costiera possono coinvolgere le barene, ad esempio nel caso di elevato trasporto lungo riva, 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 (Fig. 4.13).

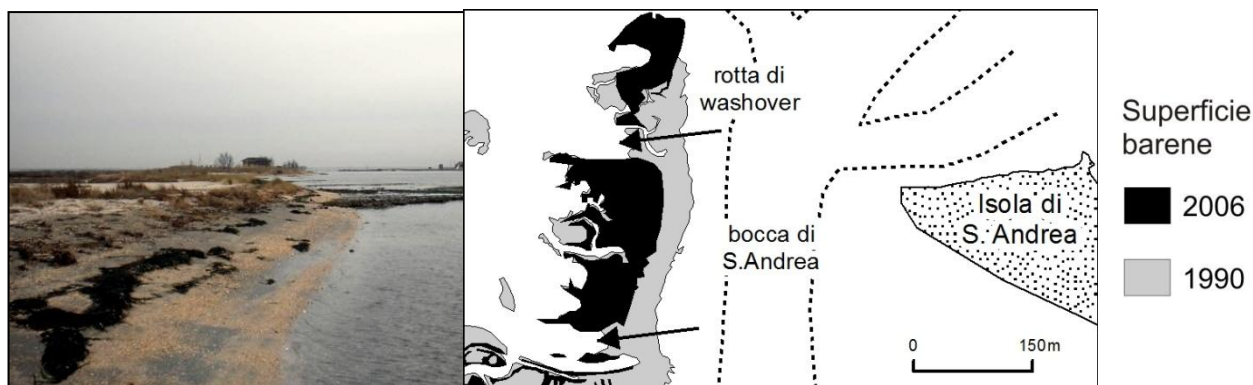


Figura 4.13 – Esempio di barene in cui è stata identificata la tipologia erosiva E4.

Perdita di barene per interventi antropici diretti (E5)

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 (Fig. 4.14).

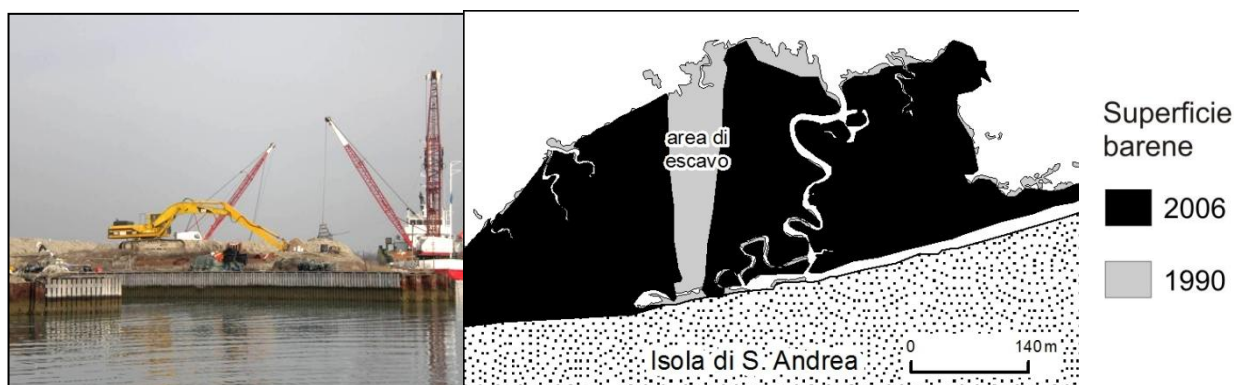


Figura 4.14 – Esempio di barene in cui è stata identificata la tipologia erosiva E5.

Formazione e/o ampliamento di barene per input fluviale (A1)

Tipico delle aree di gronda lagunare o di delta endolagunare soggette all'influsso dell'acqua dolce e salmastra e frequentemente dominate dal fragmiteto (barene di margine lagunare o di delta endolagunare), questa modalità di accrescimento avviene grazie agli apporti fluviali dal bacino scolante che vanno ad alimentare le aree più protette e prossime al margine lagunare. Si osserva un 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. Accanto alla sedimentazione diretta in queste aree secondo quanto indicato da Day et al. (2011) l'accrescimento avviene infatti tipicamente anche grazie alla crescita della vegetazione con il rapido sviluppo di apparati radicali e produzione di materiale organico, i margini accrescitivi possono essere quindi anche caratterizzati da un netto gradino che si raccorda con il fondale adiacente (Fig. 4.15).

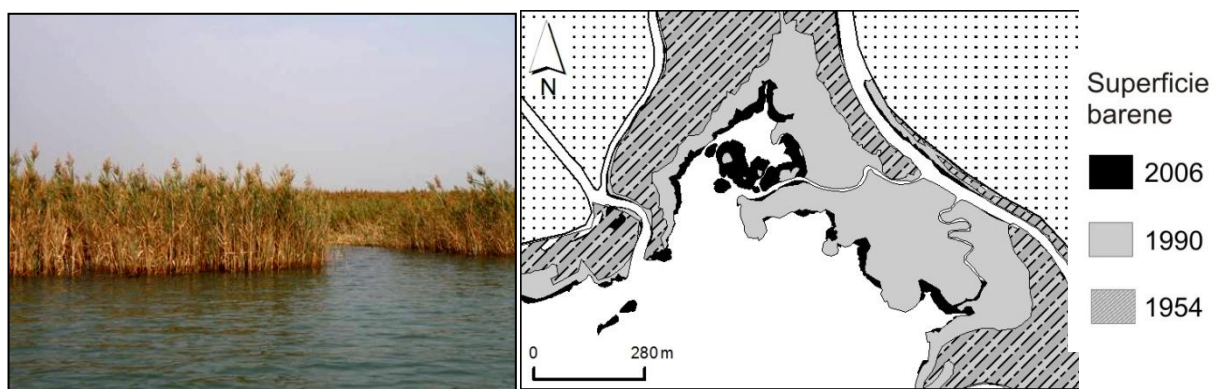


Figura 4.15 – Esempio di barene in cui è stata identificata la tipologia accrescitiva A1.

Formazione e/o ampliamento di barene per input tidale (A2)

La complessa idrodinamica lagunare fa sì che il sedimento possa essere trasportato e deposto durante ogni ciclo di marea (Albani et al, 1984). Nel caso della laguna di Grado e Marano una parte di questo sedimento proviene dal carico solido dei fiumi Isonzo e Tagliamento, successivamente veicolato in laguna attraverso le bocche durante il flusso di marea (Brambati, 1970; Gatto & Marocco, 1992; Marocco, 1995). Questo apporto consente in alcuni casi di contrastare l'innalzamento relativo del livello del mare soprattutto da parte delle barene di margine di canale e di quelle di retrobarriera. Una parte di questo sedimento inoltre può provenire da erosioni in aree lagunari adiacenti (Day et al., 1998). I processi di sedimentazione sono favoriti laddove le correnti tidali 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, spesso caratterizzati in pianta da morfologie alveolari o a *patches* (Fig. 4.16).

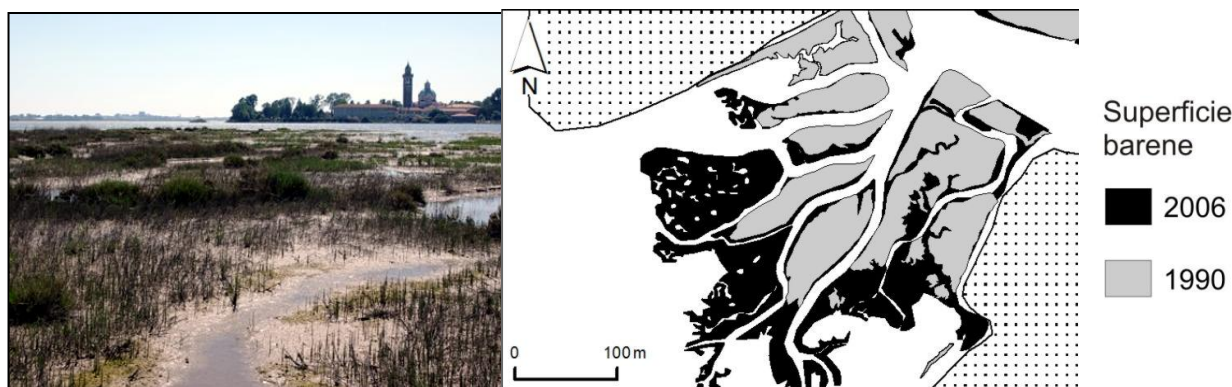


Figura 4.16 – Esempio di barene in cui è stata identificata la tipologia accrescitiva A2.

Formazione e/o ampliamento di barene in aree paralagunari recenti (A3)

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 (Fig. 4.17).

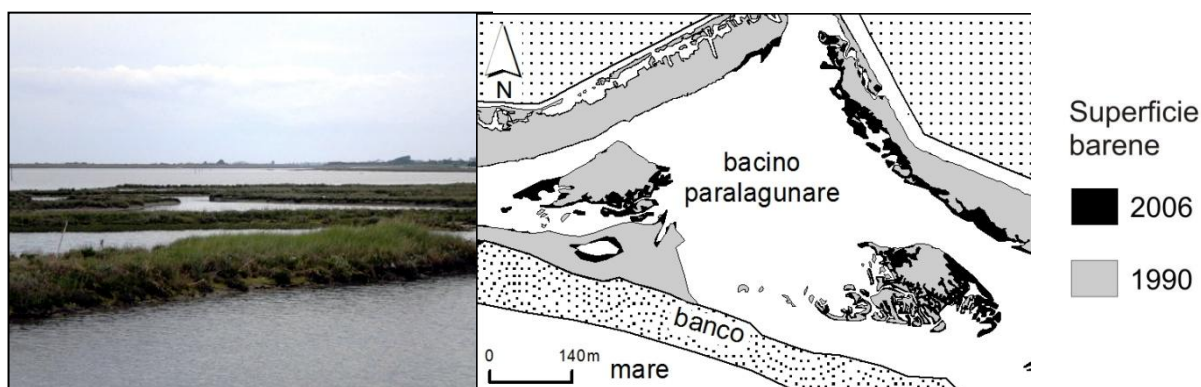


Figura 4.17 – Esempio di barene in cui è stata identificata la tipologia accrescitiva A3.

Formazione e/o ampliamento di barene in aree un tempo arginate (A4)

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 (Fig. 4.18).

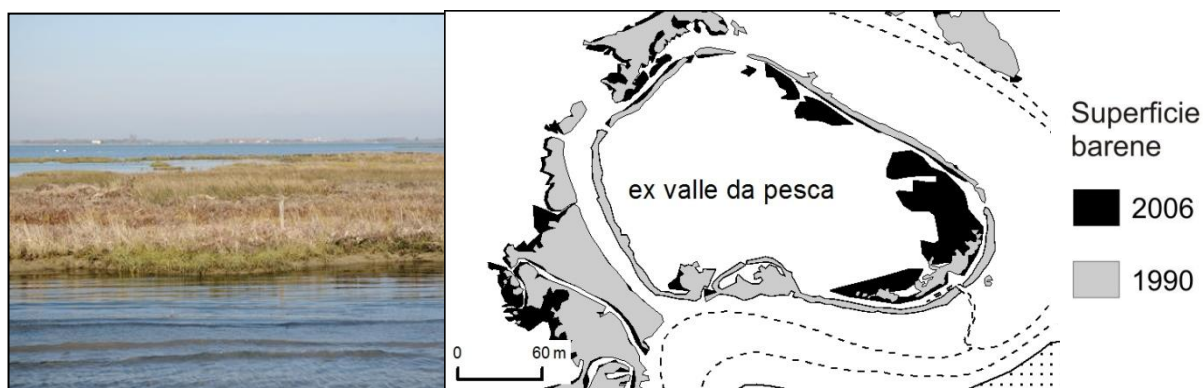


Figura 4.18 – Esempio di barene in cui è stata identificata la tipologia accrescitiva A4.

Incremento e/o creazione di barene per riporto di sedimenti dragati (A5)

Azione antropica diretta che consiste nella creazione di nuove barene lungo i margini dei canali dragati, secondo una pratica tradizionalmente utilizzata in laguna di Venezia e di Marano e Grado (Gatto & Marocco, 1992). 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 (Fig. 4.19).

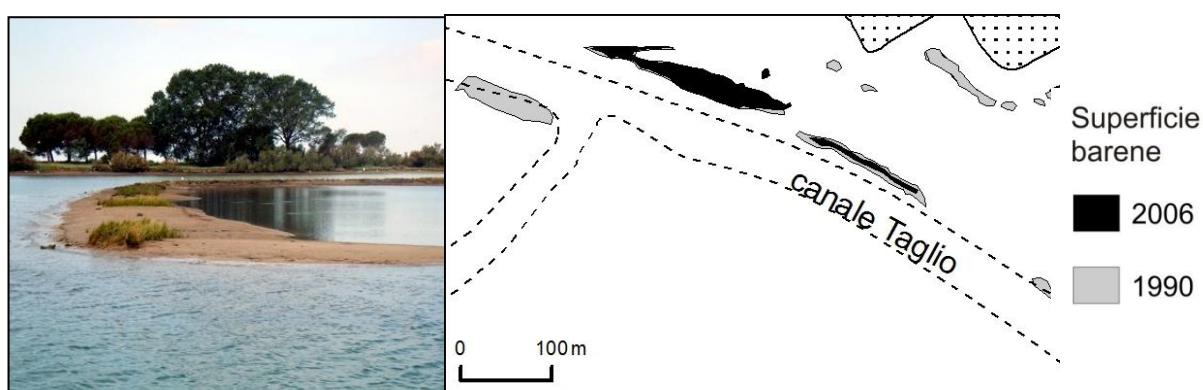


Figura 4.19 – Esempio di barene in cui è stata identificata la tipologia accrescitiva A5.

4.6 Evoluzione complessiva delle barene e analisi per gruppi

Grazie alla digitalizzazione dei margini delle barene individuate sulle foto aeree si è potuta analizzare l'evoluzione in termini di variazione areale nei due intervalli di tempo: 1954-1990 e 1990-2006. I dati (tabella 4.1 e grafico figura 4.20) mostrano una significativa diminuzione nell'estensione delle barene per l'intera laguna: da 904ha nel 1954, a 801 nel 1990 a 761ha nel 2006. In 52 anni quindi le superfici a barena sono diminuite del 16%.

Questa modificazione totale è in realtà il risultato della somma algebrica di modificazioni di segno opposto, perdite e guadagni, avvenute a differenti scale ed evidenziate grazie all'analisi topologica.

Analizzando la situazione a livello di bacino per l'intero intervallo di tempo studiato, Lignano e Morgo mostrano un incremento delle barene, S. Andrea, Buso, Grado e Primero mostrano invece una tendenza opposta.

Considerando separatamente il primo e il secondo intervallo di tempo il bacino di Lignano è passato da un trend positivo a uno negativo; Primero da uno negativo a uno positivo; S. Andrea, Buso e Grado hanno conservato un bilancio negativo, Morgo quello positivo. Si nota quindi che il comportamento dei singoli bacini si differenzia in maniera molto significativa e non è sincrono con quello della laguna nel suo complesso.

Bacino	Estensione bacino (ha)	% di barene	Estensione barene (ha)			Variazioni estensione (ha)		
			1954	1990	2006	1954-1990	1990-2006	1954 -2006
Lignano	5050	9.7	489	519	497	30	-22	8
S. Andrea	700	10.7	73	39	33	-34	-7	-41
Buso	4500	3.6	163	130	122	-33	-8	-41
Morgo	297	2.7	8	12	13	4	1	5
Grado	3314	3.5	115	60	51	-55	-8	-63
Primero	1900	3	56	42	46	-15	4	-11
Intera laguna	15761	5.7	904	801	761	-104	-40	-144

Tabella 4.1 – Variazione dell'estensione delle barene nei sei bacini componenti la laguna e per l'intera laguna, per le tre annate indagate.

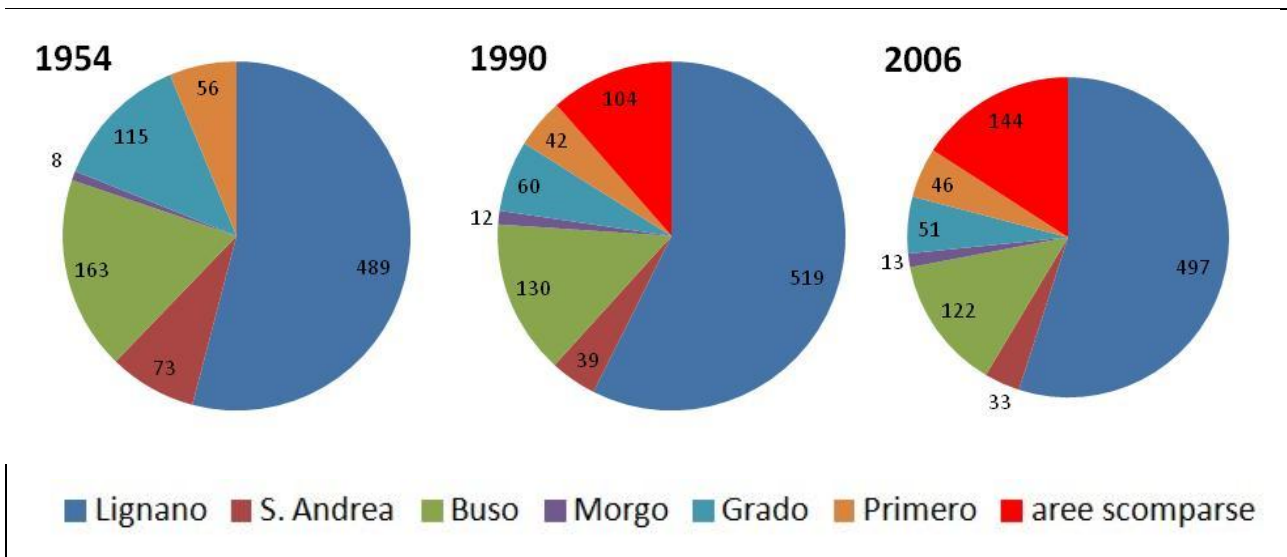


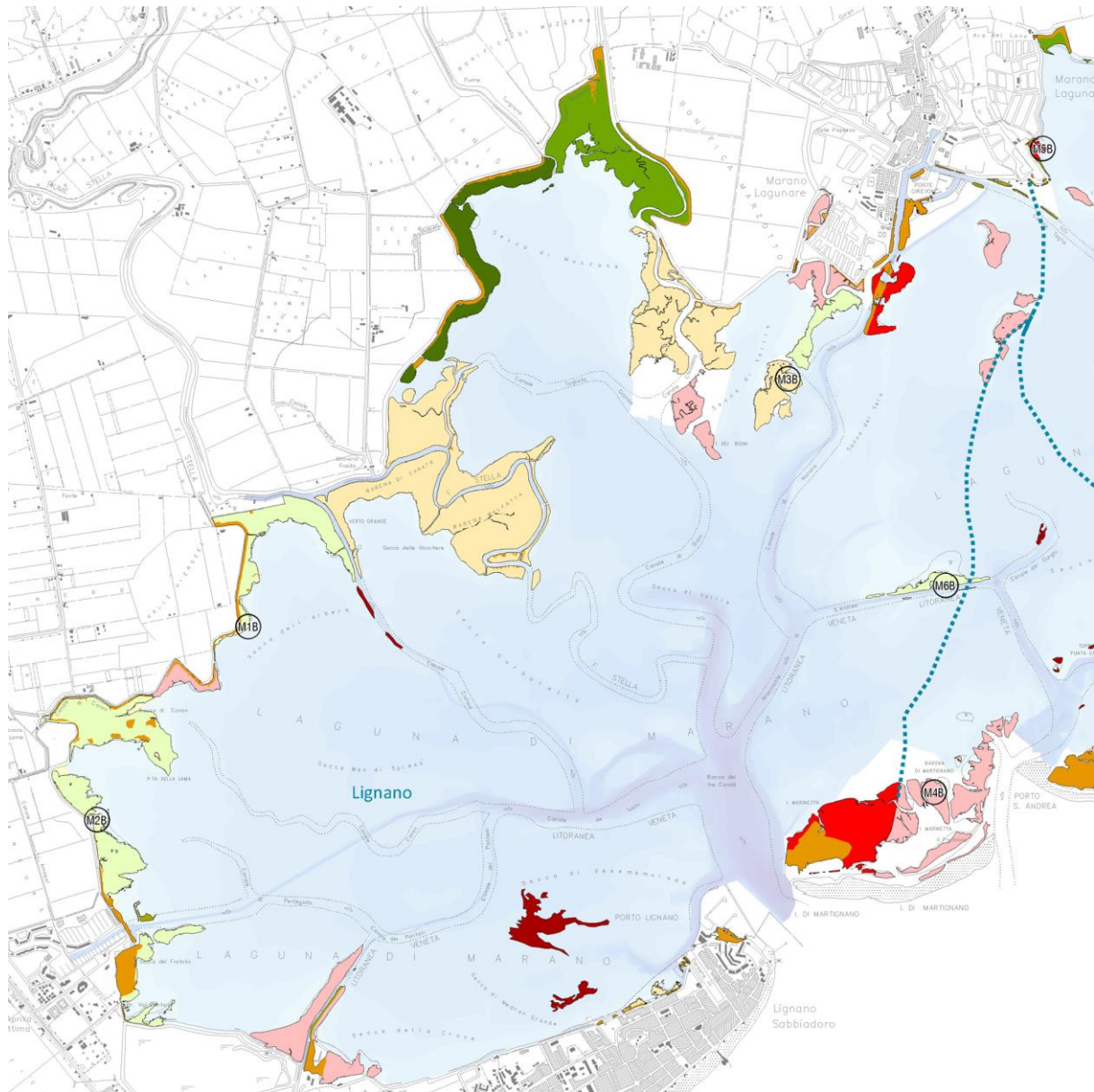
Figura 4.20 – Evoluzione dell'estensione delle barene nei sei bacini per le tre annate indagate (le estensioni sono espresse in ettari), a partire dalla situazione del 1954.

È proprio sulla base di questa considerazione che è nata la necessità di svolgere un'analisi più dettagliata all'interno di ogni bacino e quindi sui gruppi e sulle singole barene, per identificare differenti modalità evolutive e tentare di individuarne le cause, pur in un panorama carente di dati come quello descritto al capitolo 2.

L'analisi per gruppi (descritta al par. 4.3.1) consente una valutazione delle conseguenze dei fenomeni erosivi e accrescitivi in atto e del loro grado di criticità.

La variazione di superficie per ciascun gruppo nel periodo 1954-2006 calcolata in percentuale rispetto alla superficie originaria del 1954 e rappresentata cartograficamente (Fig. 4.21 a,b,c,d) consente di individuare con immediatezza le aree in cui il fenomeno erosivo si presenta con maggiore intensità e dove i fenomeni accrescitivi anche se presenti sono insufficienti a compensare le erosioni in atto.

Questo tipo di analisi consente di verificare in quali aree il fenomeno erosivo prevalga effettivamente su quello accrescitivo e fornisce uno strumento per valutare eventuali priorità di intervento. I risultati mostrano che dei complessivi 103 gruppi individuati ben 21 presentano una tendenza erosiva: in un buon numero di casi il fenomeno è abbastanza debole (perdita di superficie compresa tra il 5 e il 25%), mentre diventa più significativo (perdita di superficie compresa tra il 25 e il 50) in 10 casi, critico (tra 50 e 70%) per ulteriori 10 casi ed estremamente critico in 7 casi (superficie persa maggiore del 75%). I bacini che presentano maggior sofferenza e criticità sono Grado (dove sono presenti 5 dei sette casi appartenenti alla categoria peggiore) e Buso.



Dinamica evolutiva delle barene a livello di gruppo 1954 - 2006

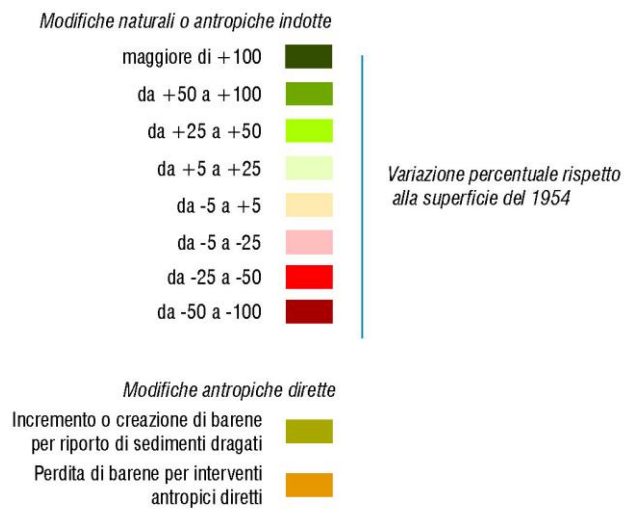


Figura 4.21a – Rappresentazione cartografica della variazione percentuale di superficie per ciascun gruppo di barene nel periodo 1954-2006, calcolata in percentuale rispetto alla superficie originaria del 1954.

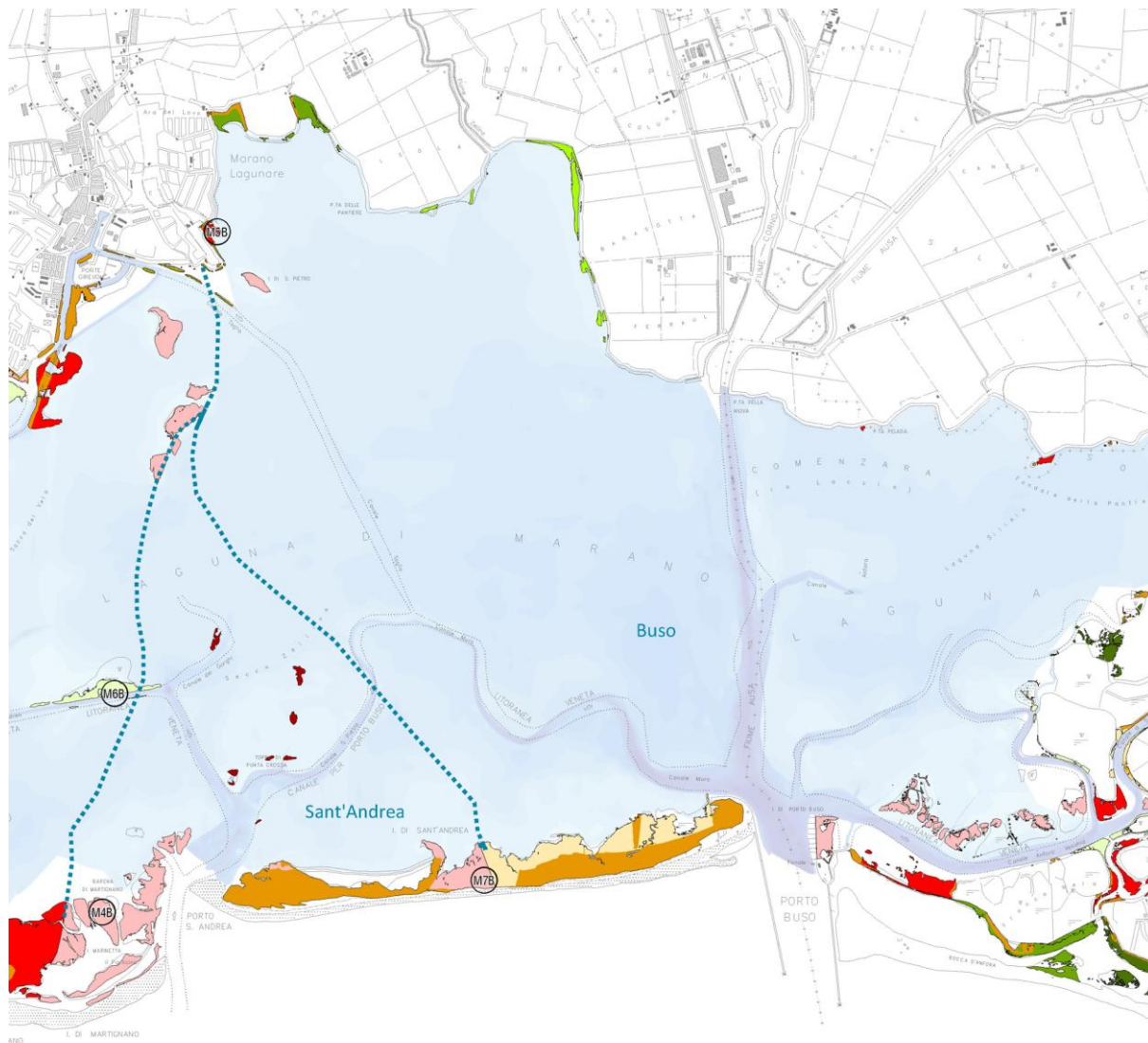


Figura 4.21b – Rappresentazione cartografica della variazione percentuale di superficie per ciascun gruppo di barene nel periodo 1954-2006, calcolata in percentuale rispetto alla superficie originaria del 1954 (la legenda è riportata in figura 4.21a).

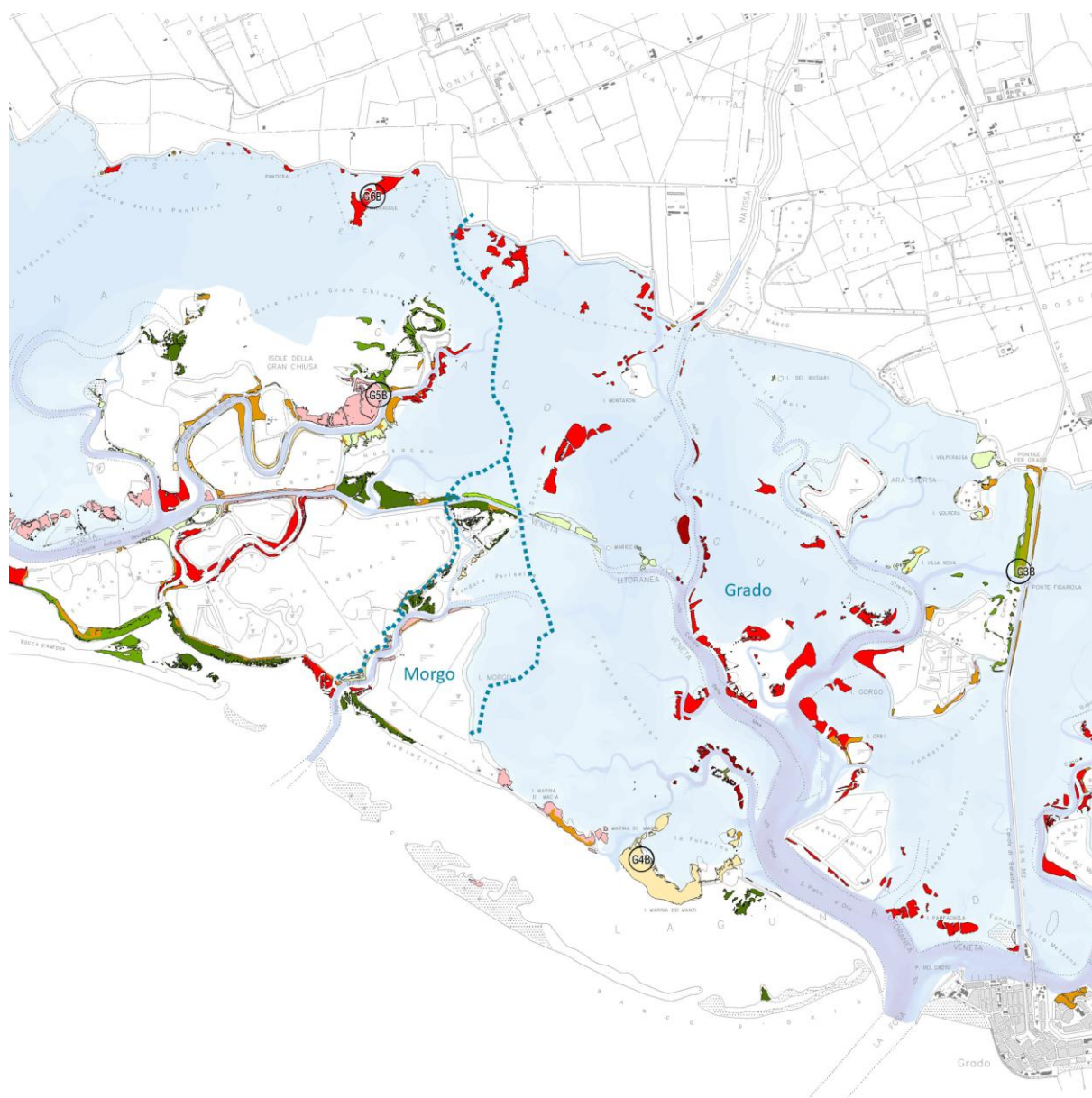


Figura 4.21c – Rappresentazione cartografica della variazione percentuale di superficie per ciascun gruppo di barene nel periodo 1954-2006, calcolata in percentuale rispetto alla superficie originaria del 1954 (la legenda è riportata in figura 4.21a).

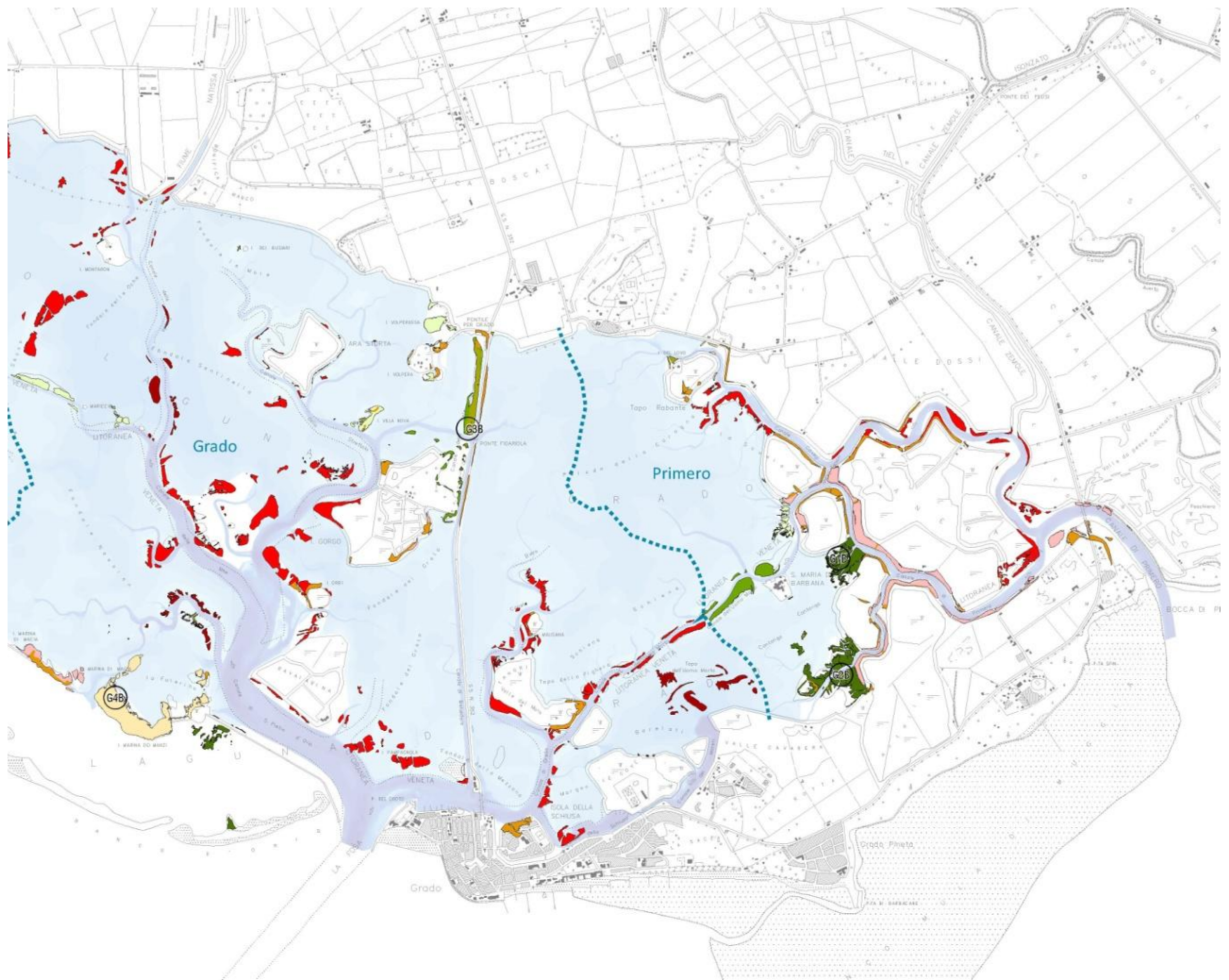


Figura 4.21d – Rappresentazione cartografica della variazione percentuale di superficie per ciascun gruppo di barene nel periodo 1954-2006. calcolata in percentuale rispetto alla superficie originaria del 1954 (la legenda è riportata in figura 4.21a).

4.7 Quantificazione dei processi

L'analisi di tipo topologico sull'intero dataset di dati a disposizione per i due intervalli di tempo (1954-1990 e 1990-2006) ha consentito di individuare con estremo dettaglio tutte le modifiche intercorse e di attribuirle alle differenti tipologie erosivo - accrescitive (esempio in figura 4.22a e 4.22b).

I risultati così ottenuti, rispetto a quelli ottenuti con l'analisi per gruppi mostrano nel complesso un generalizzato aumento delle superfici coinvolte perché sono date dalla sommatoria di ogni singola area interessata da modificazioni e non più un bilancio complessivo per un raggruppamento di barene. Molte di queste variazioni, alcune anche piccole, si compensano a vicenda e il bilancio complessivo è molto simile a quello ottenuto con il primo metodo.

Poiché come già individuato grazie all'analisi delle superfici totali ogni bacino mostra un comportamento diverso, la quantificazione delle singole tipologie erosivo - accrescitive è stata raggruppata in termini di bacini, per analizzare le tendenze evolutive in atto in ciascuno di essi.

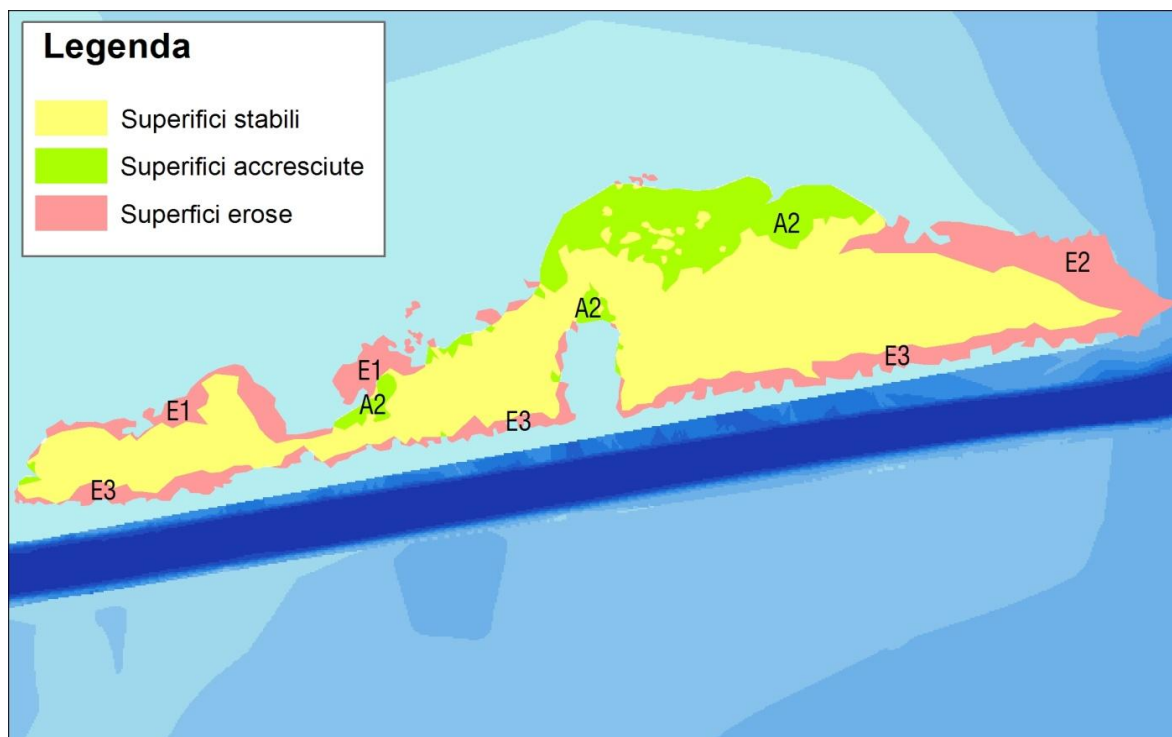


Figura 4.22a – Esempio dei risultati ottenuti dall'analisi topologica per le barene del gruppo L22 nel bacino di Lignano per il periodo 1990-2006. Su ciascuna delle aree è rappresentato il codice di attribuzione della tipologia erosiva o accrescitiva.

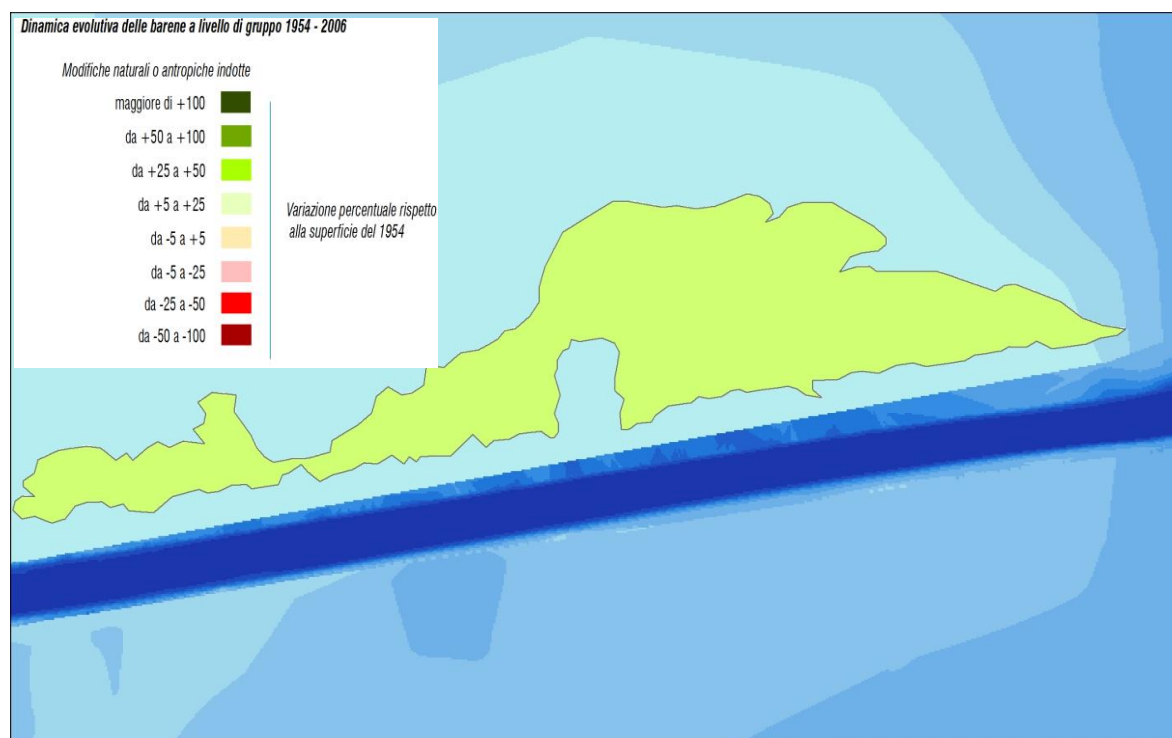


Figura 4.22b – Esempio dei risultati ottenuti dall'analisi per gruppi per le barene del gruppo L22 nel bacino di Lignano per il periodo 1954-2006.

Raggruppando per bacino i risultati relativi all'analisi topologica si ottengono i dati riportati nelle tabelle 4.7 e 4.8. e nelle figure 4.23 e 4.24. I fenomeni riscontrati vengono poi descritti di seguito, per l'individuazione dei luoghi descritti sono state utilizzate le sigle identificative dei gruppi e quelle delle aree campione (le rispettive ubicazioni sono visibili in figura 4.5 e 3.1).

Tipologia	Variazione di superficie (ha) 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
TOT	30.11	-34.31	-33.12	3.77	-55.02	-14.85	-103.42
TOT NETTO	66.57	-2.51	16.27	5.00	-45.22	-3.12	36.99
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
TOT	-22.06	-6.96	-8.30	1.05	-8.37	4.06	-40.56
TOT NETTO	-3.16	-6.52	-4.05	1.50	-7.86	5.20	-14.90

Tabella 4.7 – Sintesi dei risultati relativi all'analisi topologica per il periodo 1954-1990 e 1990-2006. La voce "Totale netto" corrisponde alla variazione totale delle superfici di barena escluse le voci E5 e A5.

Tasso di variazione di superficie (ha/anno) 1954-1990							
1954-1990	LIGNANO	S.ANDREA	BUSO	MORGO	GRADO	PRIMERO	INTERA LAGUNA
E5	-1.06	-0.88	-1.39	-0.03	-0.40	-0.33	-4.11
A5	0.05	0.00	0.02	0.00	0.13	0.01	0.21
E1	-0.87	-0.31	-0.68	-0.04	-1.21	-0.27	-3.37
E2	-0.68	-0.04	-0.07	0.00	-0.24	-0.01	-1.05
E3	-0.20	0.00	-0.29	-0.05	-0.45	-0.26	-1.25
E4	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.03
A1	1.95	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	2.13
A2	1.12	0.13	0.53	0.08	0.47	0.42	2.75
A3	0.53	0.18	0.37	0.01	0.11	0.00	1.20
A4	0.00	0.00	0.41	0.09	0.06	0.04	0.59
TOT	0.84	-0.95	-0.92	0.06	-1.53	-0.41	-2.92
TOT NETTO	1.85	-0.07	0.45	0.09	-1.26	-0.09	0.98
Tasso di variazione di superficie (ha/anno) 1990-2006							
E5	-1.23	-0.03	-0.27	-0.03	-0.04	-0.07	-1.66
A5	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06
E1	-1.11	-0.57	-0.97	-0.14	-0.64	-0.28	-3.71
E2	-0.64	-0.02	-0.13	0.00	-0.14	-0.01	-0.94
E3	-0.24	0.00	-0.06	-0.04	-0.09	-0.09	-0.52
E4	0.00	-0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.14
A1	1.03	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	1.16
A2	0.77	0.19	0.30	0.12	0.34	0.67	2.39
A3	0.00	0.13	0.22	0.11	0.02	0.00	0.48
A4	0.00	0.00	0.26	0.04	0.02	0.03	0.34
TOT	-1.38	-0.43	-0.52	0.07	-0.52	0.25	-2.54
TOT NETTO	-0.20	-0.41	-0.25	0.09	-0.49	0.32	-0.93

Tabella 4.8 – Sintesi dei tassi di variazione annua delle superfici e barena per il periodo 1954-1990 e 1990-2006, per ciascuna delle tipologie erosive o accrescitive individuate. La voce “Totale netto” corrisponde alla variazione totale delle superfici di barena escluse le voci E5 e A5.

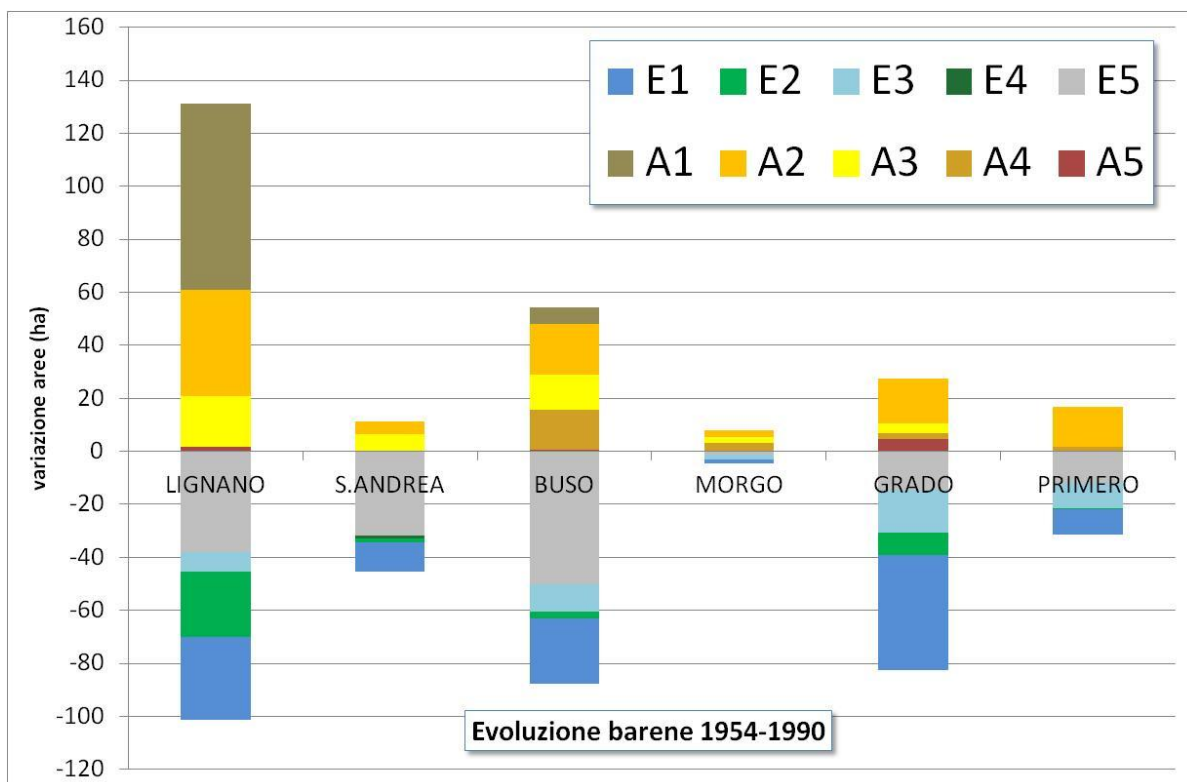


Figura 4.23 – Rappresentazione grafica della diversa distribuzione delle tipologie erosivo - accrescitive per ogni bacino per il periodo 1954-1990.

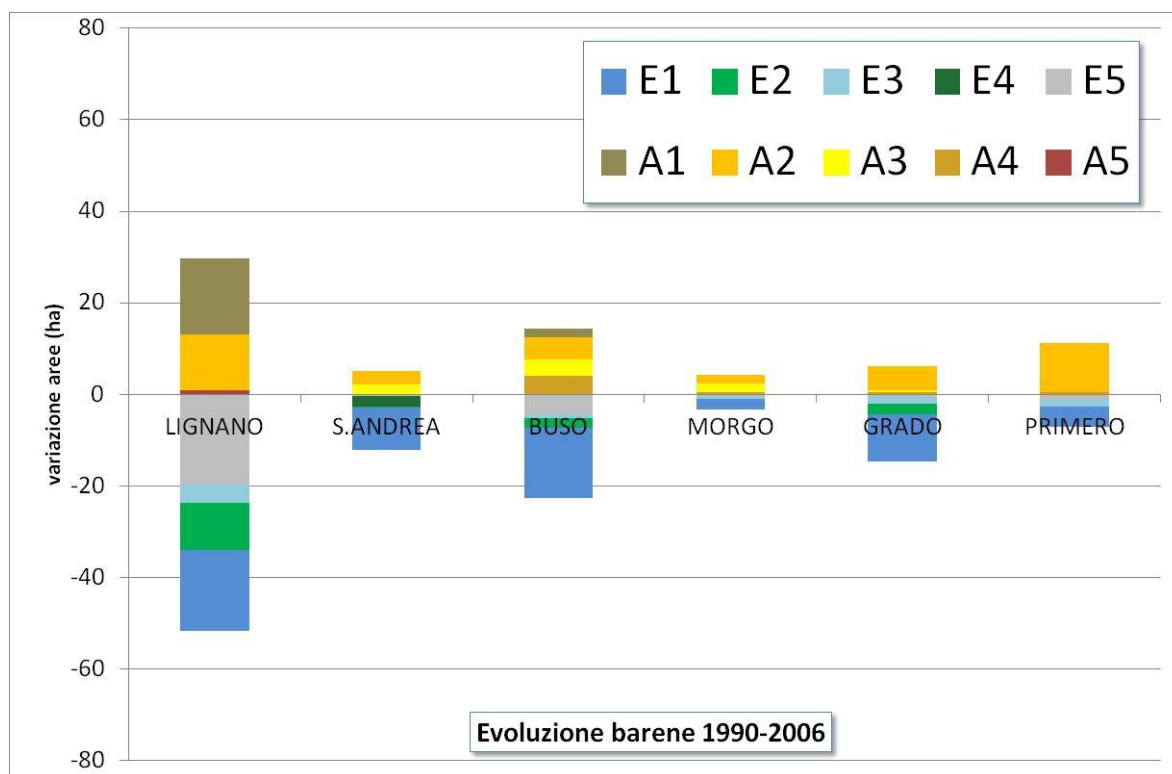


Figura 4.24 – Rappresentazione grafica della diversa distribuzione delle tipologie erosivo - accrescitive per ogni bacino per il periodo 1990-2006.

Erosione delle barene per annegamento (E1)

Nel complesso il fenomeno erosivo E1 coinvolge un totale di 180ha di barene dal 1954 al 2006, ed è un fenomeno che si esplica soprattutto per le barene di margine di canale e per quelle di retrobarriera.

L'entità del fenomeno, che a scala di intera laguna mostra un lieve aumento per il secondo periodo considerato, sembrerebbe in parte confermare l'importanza della componente eustatica durante l'epoca più recente che è caratterizzata da un tasso di innalzamento di quattro volte maggiore del periodo precedente (cfr par. 2.1). La variabilità con cui il fenomeno si presenta sia nella sua espressione morfologica, sia in termini di entità alle differenti scale di analisi (di bacino e di gruppo di barene), lo identifica piuttosto come il risultato della complessa interazione tra le forzanti a larga scala (eustatismo e subsidenza regionale) e quelle locali (ratei di sedimentazione e autocompattazione).

Uno degli esempi in cui si manifestano i fenomeni di annegamento sono le barene di retrobarriera presenti nella porzione orientale dell'isola di Martignano compresa nei bacini di Lignano e S.Andrea (gruppi S1 e L23, area campione M4B), dove alla vecchia struttura a *beach ridges* (ben visibile nel relativo profilo topografico al par. 3.3) si affianca un'area a barena con ghebi e chiari, che durante il periodo più recente è stata interessata da una perdita di quota con degrado della vegetazione di barena e diffusione di *Spartina maritima*, tipica delle aree perennemente inondate.

Nel bacino di Grado i fenomeni di annegamento sono i più diffusi ed evidenti (E1 pari a -43,4ha nel 1954-1990 e a -10,25ha nel 1990-2006), seguiti in ordine di importanza da quelli di Buso, che assumono maggior entità nel secondo periodo (-24.5ha nel 1954-1990 e a -15.5ha nel 1990-2006 che corrispondono a un tasso di -0.68 e -0.97 ha/anno rispettivamente).

Erosione delle barene causata da moto ondoso da vento (E2)

Nel complesso a questa forzante sono state attribuite perdite di superficie pari a 52,8 ha di barene dal 1954 al 2006.

Questa tipologia erosiva appare estremamente rilevante nel bacino di Lignano (-34,8ha per l'intero periodo) a causa della presenza di un ampio specchio acqueo privo di accidenti morfologici emersi che determina un elevato fetch disponibile nei confronti soprattutto degli eventi di bora. Il fenomeno appare infatti rilevante sulle barene che ne bordano il margine occidentale (gruppo L5, L6, L7): qui l'arretramento dei margini è progressivo dal 1954 e raggiunge valori massimi di 30m (gruppo L6). Il fenomeno interessa anche i delta endolagunari che si protendono verso la parte centrale dello specchio lagunare dove però tende a verificarsi in concomitanza agli effetti dell'annegamento e del moto ondoso da natanti (gruppi L3, L9, L14).

Nei bacini di Grado e Buso, anch'essi sedi di fenomeni importanti anche se in quantitativo assoluto meno rilevanti (rispettivamente con -10.9 e -4.7ha), ad essere state coinvolte sono soprattutto le barene isolate, dove si manifestano evidenti processi di arretramento dei margini e frammentazione. L'esempio

più significativo è costituito dal gruppo delle Mandragole (gruppo B24, dove è ubicato il caso studio G6B): si tratta di barene isolate che mostrano un vistoso arretramento dei margini e un progressivo processo di frammentazione per una commistione di annegamento ed erosione da moto ondoso (E1, E2).

Erosione delle barene causata da moto ondoso da natanti (E3)

La perdita totale è stata quantificata in 53,25ha, con particolare rilevanza nei bacini di Grado, Lignano, Primero e Buso.

Il bacino di Lignano, attraversato da importanti vie d'acqua navigabili con elevato traffico soprattutto turistico, presenta un'entità significativa in termini di superfici coinvolte (-11ha) che si concentra sulle poche barene di margine di canale presenti. Gli unici casi presenti bordano il canale della Litoranea Veneta (nella parte denominata Allacciante di S. Andrea corrispondente al gruppo L22 e al caso studio M6) e il canale di accesso al porto di Marano Lagunare (gruppo L18). Entrambi presentano il fenomeno in maniera evidente con un arretramento del margine rispettivamente di 22m (periodo 1954-2006) e di 16m (1990-2006), quest'ultimo verificatosi in seguito all'escavo di accesso al porto di Marano. In entrambe le aree si è avuta una certa espansione della barena sul lato opposto quello in erosione, secondo il fenomeno già precedentemente descritto, consentendo di ipotizzare una parziale rideposizione del sedimento eroso.

L'erosione che interessa il bacino di Grado appare molto rilevante soprattutto per il primo intervallo di tempo mentre si riduce fortemente nel secondo (tassi di -0.45 e -0.09 rispettivamente), anche per la forte diminuzione di superfici esposte a questa forzante.

Erosione delle barene causata da processi di dinamica costiera (E4)

Il fenomeno è stato osservato in un unico caso, che rappresenta anche l'unico caso di bocca non armata dell'intera laguna. Il lato occidentale della bocca di S.Andrea (afferente al piccolo bacino omonimo) è infatti soggetto a un significativo sfasamento tra i lati sopraflutto e sottoflutto con un continuo arretramento della linea di riva sul lato sottoflutto (Fontolan et al., 2007), che ha determinato la perdita di una superficie di barene pari a 3.2ha durante il periodo 1954–2006 (gruppo S1).

Perdita di barene per interventi antropici diretti (E5)

Dall'osservazione delle foto aeree risulta evidente che una gran parte delle superfici a barena andate perdute sono imputabili a interventi antropici diretti come aree di bonifica agricola, escavo di canali, costruzione di darsene, ampliamenti di valli da pesca. Il fenomeno coinvolge complessivamente una

superficie di 147,8ha localizzati nei bacini di Lignano, S. Andrea e Buso durante il periodo 1954–1990 e di 26,6ha soprattutto a Lignano e Buso, dopo il 1990.

Tra le differenti tipologie di intervento i più rilevanti sono quelli che hanno coinvolto le isole barriera, con la bonifica di aree per l'acquacoltura o l'agricoltura ad esempio a Martignano (gruppo L23) e S. Andrea (gruppi S2, B1). Altri interventi importanti di sottrazione di aree a barena sono stati realizzati per ampliamento e costruzione di nuove aree vallive o per escavazione di canali e di darsene. Rispetto alla prima fase dell'analisi, quando le superfici coinvolte dagli interventi antropici erano state quantificate in 103ha nel primo e 22.8ha nel secondo periodo, i risultati mostrano valori molto più elevati. Questo perché l'analisi topologica ha consentito di individuare con maggior dettaglio le singole aree interessate, correggendo alcuni errori e sottostime e soprattutto aggiungendo al computo una miriade di piccoli interventi, che non erano stati inizialmente computati. Se ci si riferisce al primo periodo infatti sono ben 312 le aree categorizzate come E5, dei quali cui ben 290 hanno un'estensione inferiore a 1ha e 183 inferiore a 0.1ha. Riferendosi al secondo periodo le aree categorizzate come E5 sono 116 ed escludendo i due interventi più estesi, gli altri hanno un'estensione media pari a 0.08ha, che sommati corrispondono però complessivamente a ben 9ha.

Formazione e/o ampliamento di barene per input fluviale (A1)

Nonostante la quasi totale assenza di dati relativi all'apporto solido dei fiumi e dei corsi d'acqua che sfociano in laguna, il mantenimento e l'espansione delle barene verificata nelle aree di gronda lagunare costituisce un'evidenza del fatto che questo apporto vi sia realmente.

Il fenomeno riguarda quasi esclusivamente il bacino di Lignano, dove si assiste a una grande espansione delle barene legate all'input fluviale e dove dati sedimentologici e geochimici (Marocco, 1995) confermano l'origine fluviale per i sedimenti dei fondali lagunari. Mentre i delta endolagunari hanno conservato quasi inalterata la loro forma ed estensione (gruppi L6, L9, L12), rilevanti fenomeni accrescitivi si sono manifestati soprattutto per le barene di margine lagunare situate nelle baie protette tra i lobi deltizi, interessate dall'influsso delle acque dolci e dominate in genere dalla presenza del fragmiteto, anche se l'entità del fenomeno è andata decrescendo nel secondo periodo. Una delle aree coinvolte è il lato orientale della Secca Muzzana (gruppo L11) dove l'accrescimento netto è stato pari a +21,13ha tra il 1954 e il 1990, soprattutto in conseguenza dell'arginamento e della bonifica di una vasta area a barena, realizzati nei primi anni '50. In seguito alla costruzione dell'argine di conterminazione le barene rimaste all'interno dello specchio lagunare si sono espanse sull'originaria piana di marea grazie al sedimento distribuito lungo alcuni canali lagunari, successivamente in parte interrati. Dopo il 1990 questa fase di espansione si è ridotta drasticamente (soli +4,55ha). Essa rappresenta quindi, in quanto parte emersa, il risultato più evidente e più facilmente quantificabile dell'apporto sedimentario fluviale, che attualmente si ridistribuisce su uno spazio di accomodamento maggiore rispetto al passato. Questa parte del bacino, infatti, presenta profondità più elevate verso il centro, come riportato nella *Carta*

Batimetrica della Laguna di Marano e Grado (Triches et al., 2011). Per gli altri bacini questa tipologia non è stata assegnata vista l'assenza di sbocchi fluviali, con l'unica eccezione del bacino di Buso dove sono stati individuati accrescimenti complessivi pari a 8.5ha per l'intero periodo. Essi si sono verificati soprattutto in corrispondenza dello sbocco in laguna dello Zellina (gruppo B10) e sul margine lagunare compreso tra l'abitato di Marano Lagunare e la Punta delle Pantiere (gruppo B9).

Formazione e/o ampliamento di barene per input tidale (A2)

L'accrescimento indotto dai sedimenti trasportati ad opera delle correnti tidali (A2) è stato significativo in termini di aree coinvolte (99ha durante il periodo 1954–1990 e 38 ha nel 1990–2006), mostrando un trend abbastanza costante. Si tratta però spesso di aree molto piccole, collocate in gruppi di barene interessate da bilanci anche frequentemente negativi.

Il fenomeno è stato significativo in particolare nel bacino di Lignano (+40,3ha nel periodo 1954-1990 e +12,3ha nel 1990-2006) dove in alcuni casi ha compensato fenomeni erosivi indotti da vento (gruppo L5) o moto ondoso da natanti (L18, L22) permettendo anche di mantenere un bilancio complessivamente positivo.

L'espansione delle barene associata a questa forzante appare attiva soprattutto in quei bacini che mostrano morfologie piuttosto complesse e articolate dovute in parte alla presenza di forme ereditate dall'antecedente pianura alluvionale (Oertel & Woo, 1994), o in parte dovuta all'estesa presenza di valli da pesca, condizioni che si verificano soprattutto nei bacini di Primero (+25.9ha per l'intero periodo) e Morgo (+4.76 ha), dove il fenomeno mostra un trend in aumento nel periodo più recente. Dal punto di vista morfologico questi bacini sono caratterizzati da un'estesa rete di canali secondari, velme e valli da pesca (388ha a Primero, 85ha a Morgo). Una situazione simile è stata verificata per il bacino di Treporti in laguna di Venezia, che rappresenta l'unico bacino veneziano a mostrare un bilancio positivo durante i decenni recenti (Sarretta et al., 2010).

Nel bacino di Grado il fenomeno mostra invece un decremento tra il primo e il secondo periodo. L'aspetto più interessante appare legato al bacino di Primero dove importanti fenomeni di accrescimento (i più estesi ed evidenti di tutta la laguna) si verificano in corrispondenza di alcuni apparati di barene (gruppi P9, P10, P11, area campione G1B) estesi complessivamente per 24ha, localizzati in aree in cui i canali principali non sono bordati da argini. Qui le barene assumono una disposizione a ventaglio, incise da canali secondari che si dipartono da quello principale verso l'area di velma, a testimonianza di come qui il flusso delle corrente non più contenuto si espanda e diminuendo in velocità provochi la deposizione del sedimento.

Formazione e/o ampliamento di barene in aree paralagunari recenti (A3)

Questo fenomeno mostra un valore per l'intera laguna che si diversifica molto tra il primo e il secondo periodo (+44,9 ha e 7,7 ha rispettivamente). Ciò dipende essenzialmente dagli estesi fenomeni accrescitivi che hanno riguardato l'isola barriera di Martignano posta a cavallo tra i bacini di Lignano e S. Andrea (gruppo L23), dove è avvenuta dopo il 1954 la formazione di un'estesa area a barena (+18ha) in seguito all'accrescimento di nuovi banchi sabbiosi verso mare. Esclusa quest'area gli altri accrescimenti significativi sono registrati nel bacino di Buso e in misura più contenuta in quello di Morgo.

Poiché questi fenomeni accrescitivi non dipendono, come visto, da processi strettamente lagunari bensì da quelli costieri, essi devono essere considerati separatamente quando si debba affrontare gli aspetti di bilancio sedimentario, ma anche quelli gestionali.

Formazione e/o ampliamento di barene in aree un tempo arginate (A4)

Questa tipologia accrescitiva comprende di fatto due distinte casistiche.

Da un lato l'abbandono di valli da pesca può avere come conseguenza che alcune aree barenali un tempo comprese entro gli argini delle valli da pesca e quindi escluse dalla perimetrazione dei bacini lagunari vengano di fatto conteggiate come estensioni di nuove barene, essendo di fatto nuovamente aperte al flusso di marea.

In secondo luogo in alcune aree vallive che apparivano già abbandonate nel 1954 gli argini residui hanno funzionato da protezione favorendo l'espansione delle barene nell'area interna (gruppo B20 area campione G5B).

Nonostante questo processo sia di fatto molto modesto in termini quantitativi, esso appare importante dal punto di vista gestionale come segnale di possibile resilienza da parte delle aree lagunari più protette e quindi della possibilità di favorire fenomeni simili in maniera guidata.

Incremento o creazione di barene per riporto di sedimenti dragati (A5)

Nel caso di riporto del sedimento dragato dai canali sul bordo degli stessi, se le quote sul l.m.m. sono sufficienti, le superfici possono essere ricoperte dalla vegetazione spontanea ed evolversi in modo naturale. La loro presenza può inoltre favorire l'instaurarsi di condizioni di acque protette e favorire i processi deposizionali.

Gatto & Marocco (1992) hanno puntualizzato l'esistenza di queste tipologie di barene nel bacino di Grado (chiamandole *pseudobarene*), la maggior parte delle quali però esistevano già nel 1954. Non esistono dati sui dragaggi e sulle pratiche di riporto dei sedimenti che possano essere utili a quantificare il fenomeno; una parte di questi è stata quantificata grazie all'evidenza delle foto aree considerate ed è quasi esclusiva del bacino di Grado per il primo periodo (gruppo G20 area campione G3B).

Escludendo dalla variazione complessiva delle superfici verificate a scala di bacino gli interventi antropici diretti (tipologie E5 e A5) si ottiene la quantificazioni delle variazioni “naturali “ riportata in tabella 4.7 e 4.8 alla voce “tot netto”; il confronto di questi risultati per i due periodi e per l’intervallo di tempo totale è riportato nella tabella di sintesi qui sotto (Tab. 4.9).

Gli interventi antropici giocano un ruolo cruciale nella valutazione delle perdite di superfici a barena; quelle imputabili a cause “naturali” (anche se in molti casi innescate o favorite indirettamente dagli interventi antropici) mostrano un’inversione di tendenza tra il primo e il secondo intervallo di tempo a scala di intera laguna, ma comportamenti variabili a scala di singolo bacino. 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. S.Andrea e Grado confermano invece una tendenza erosiva in atto per entrambi i periodi, che mostra un incremento solo nel primo caso. 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 secondo periodo. 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 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).

	LIGNANO	S.ANDREA	BUSO	MORGO	GRADO	PRIMERO	INTERA LAGUNA
	variazione (ha)						
1954-1990	66.6	-2.5	16.3	5.0	-45.2	-3.1	37.0
1990-2006	-3.2	-6.5	-4.1	1.5	-7.9	5.2	-14.9
1954-2006	63.4	-9.0	12.2	6.5	-53.1	2.1	22.1
	tasso (ha /anno)						
1954-1990	1.8	-0.1	0.5	0.1	-1.3	-0.1	1.0
1990-2006	-0.2	-0.4	-0.3	0.1	-0.5	0.3	-0.9
1954-2006	1.2	-0.2	0.2	0.1	-1.0	0.0	0.4
	variazioni %						
1954-1990	13.6	-3.4	10.0	63.3	-39.4	-5.5	4.1
1990-2006	-0.6	-16.7	-3.1	13.0	-13.2	12.5	-1.9
1954-2006	13.0	-12.3	7.5	82.3	-46.3	3.7	2.4

Tabella 4.9 – Tabella di sintesi che riporta le variazioni di estensione delle superfici, i tassi e le variazioni percentuali per i tre intervalli di tempo, ottenute una volta esclusi gli interventi antropici diretti (tipologie E5 e A5).

4.8 Confronto con i bilanci di bacino

Il comportamento evolutivo delle barene, principale oggetto di questo lavoro, è stato messo a confronto con quello dei fondali lagunari, ricavato dalle uniche due levate batimetriche esistenti per l'intera laguna: *Carta Idrografica della laguna di Grado e Marano* (Dorigo, 1966) e *Carta Batimetrica della Laguna di Marano e Grado* i cui dati sono stati rilevati nel corso del 2009, 201 e 2011 (Triches et al., 2011). Le fonti e la metodologia sono descritti al par 4.3.4.

I risultati ottenuti possono essere analizzati da differenti punti di vista, il primo dei quali considera la rappresentazione dei dati ipsometrici in curve di frequenza relative alle diverse classi di profondità individuate.

Analizzando la rappresentazione dell'ipsometria del 1966 (Fig. 4.25) si nota che la laguna assume una differente connotazione a seconda del bacino considerato, in accordo con quanto finora evidenziato relativamente agli aspetti riguardanti le sole barene. 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 -0,25m ossia in corrispondenza dei fondali intertidali (velme), i quali costituiscono il 46% della superficie complessiva per Grado, il 33,5% per Primero e il 32% per Morgo. I fondali al di sotto della profondità -0,75m sono completamente assenti. Una moda secondaria è presente per tutti e tre i bacini alle profondità tra -2 e -5m che corrispondono ai canali. Questo tipo di modello ipsometrico è stato riscontrato anche per la laguna di Venezia (Sarretta et al., 2010).
- Un secondo modello ipsometrico accomuna i bacini di Lignano e Buso: la classe modale principale corrisponde alle profondità comprese tra -1 e -0,75m (piane subtidali) con percentuali molto simili per i due bacini (29% e 32 % rispettivamente); vi è poi la moda secondaria corrispondente ai canali (tra -2 e -5m) già riscontrata nel caso precedente. Per il bacino di Lignano le velme risultano scarsamente rappresentate.

Questi due modelli così macroscopicamente diversi possono senz'altro essere imputati alle differenti origini e maturità dei due sistemi lagunari che abbiamo già descritto al paragrafo 2.2: il sistema Buso – Lignano ossia la laguna di Marano, più antica e con caratteri più simili ad una baia e il sistema di Morgo, Grado e Primero ossia la laguna di Grado, più recente e ricca di accidenti morfologici.

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 e per il fatto di essere ormai limitato all'area più prossima alla bocca; 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 S. Andrea (Brambati, 1966).

La curva che rappresenta l'ipsometria complessiva della laguna è ovviamente 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 più difficile l'identificazione dei due modelli precedentemente individuati (Fig. 4.26). Per semplificare visivamente i confronti essi sono rappresentati a gruppi nei grafici di fig 4.27a -b).

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 -1,5m), 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 -0,75m) 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 S.Andrea presenta le modifiche più rilevanti con un significativo approfondimento delle piane e l'assunzione di una caratteristica marcatamente maranese.

Caratteristica comune inoltre a quasi tutti i bacini è un decremento di percentuale nella classe modale che corrisponde ai canali (tra -2 e -5m), provocato dal significativo interrimento dei canali, fenomeno che è stato una delle principali problematiche lagunari negli ultimi decenni e riscontrato anche in laguna di Venezia.

Un altro dato utile a comprendere le tendenze evolutive in atto è la profondità media dei singoli bacini per le due annate considerate; come evidente dal grafico di figura 4.28 per essa risulta un aumento generalizzato, con l'unica eccezione per il bacino di Lignano che la mantiene inalterata.

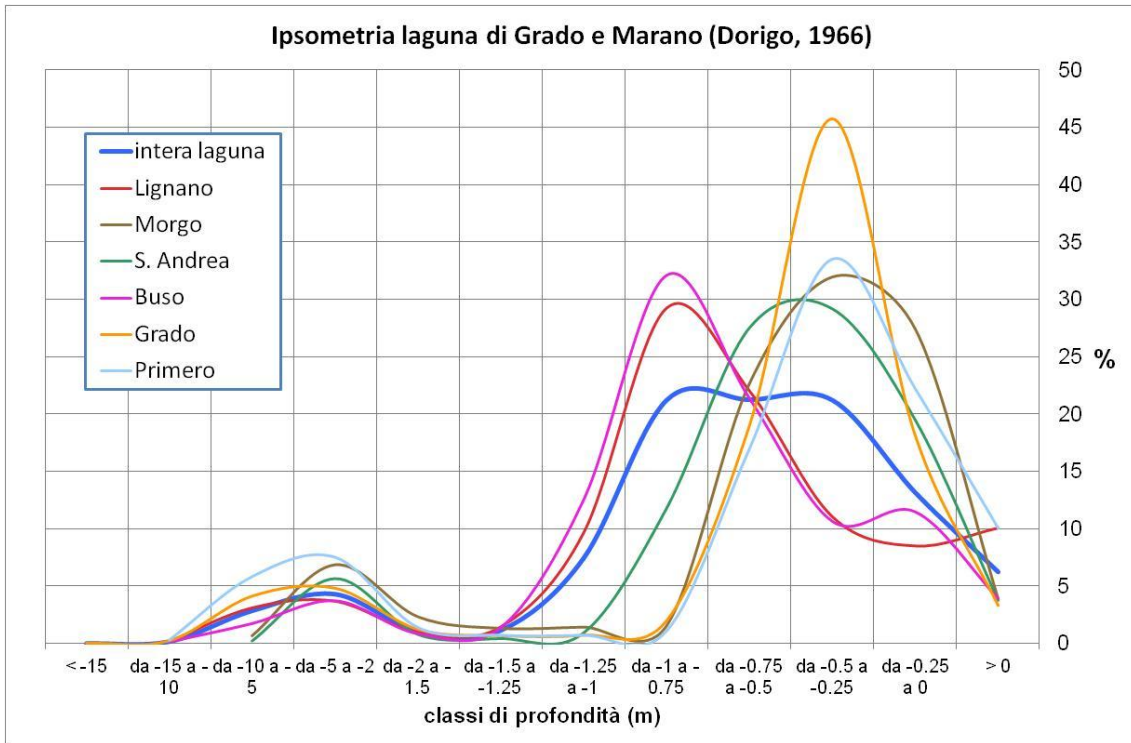


Figura 4.25 - Distribuzione ipsometrica dei bacini che compongono la laguna di Marano e Grado in base alla batimetria del 1966.

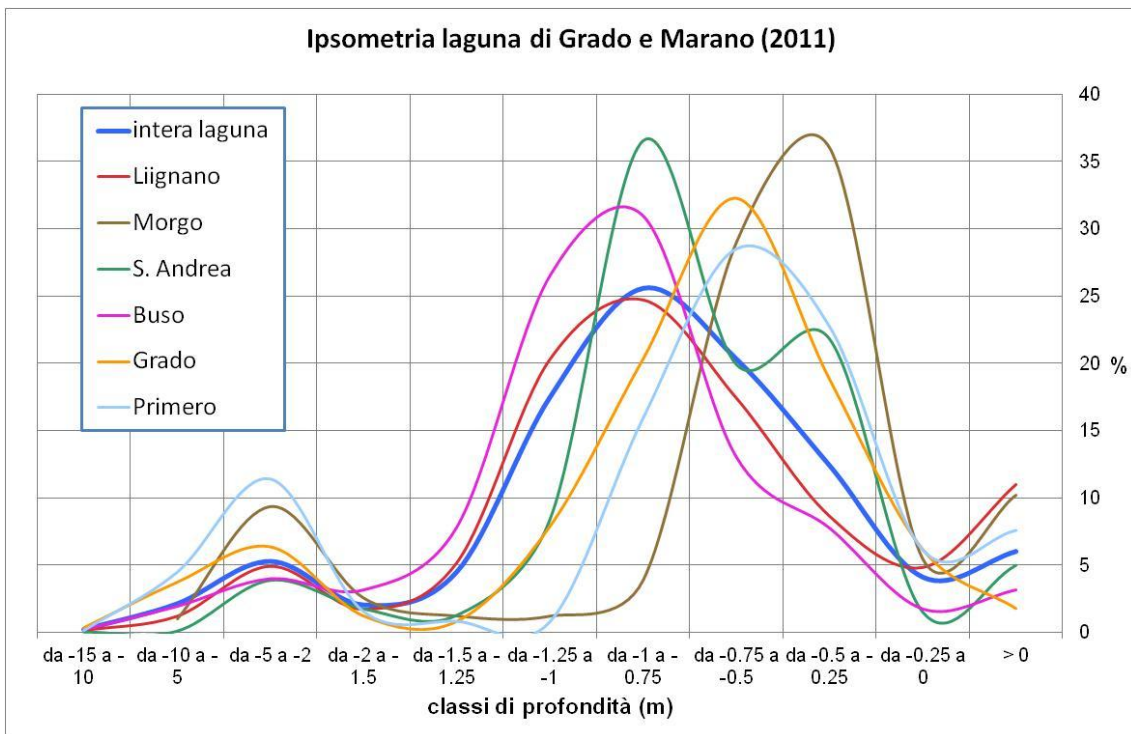


Figura 4.26 - Distribuzione ipsometrica dei bacini che compongono la laguna di Marano e Grado in base alla batimetria del 2011.

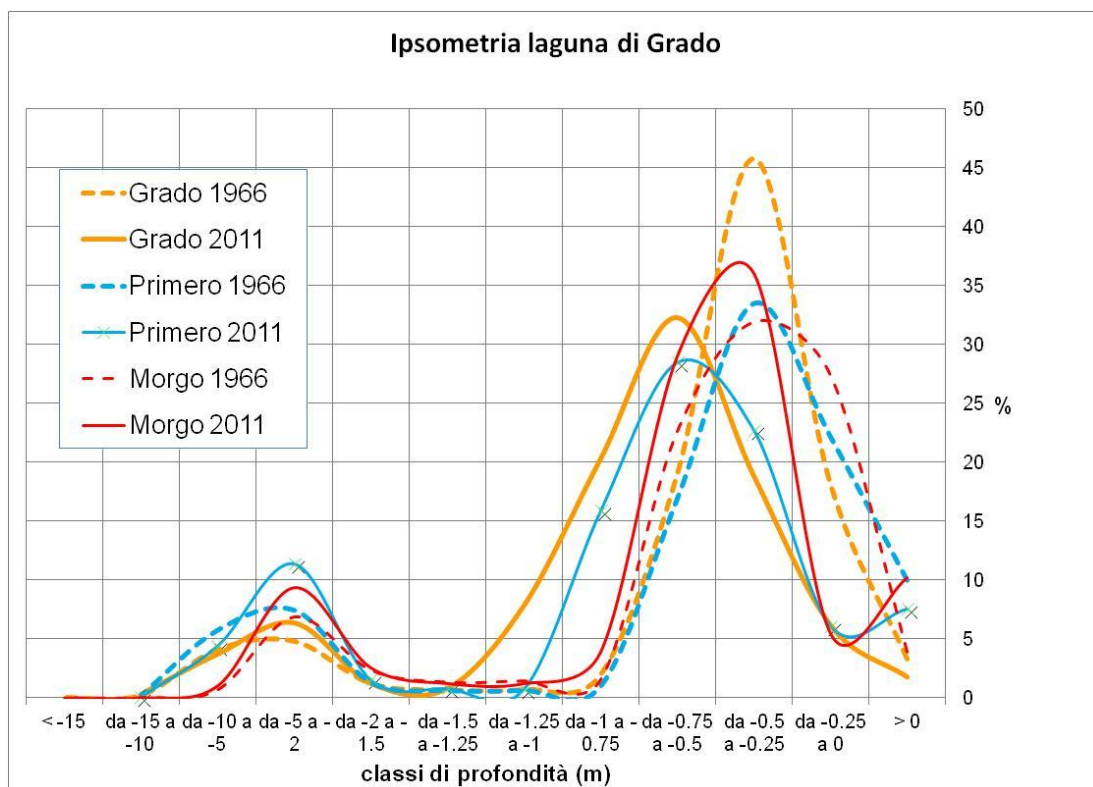


Figura 4.27a - Confronto della distribuzione ipsometrica per il periodo 1966-2011, per i bacini che compongono la laguna di Grado.

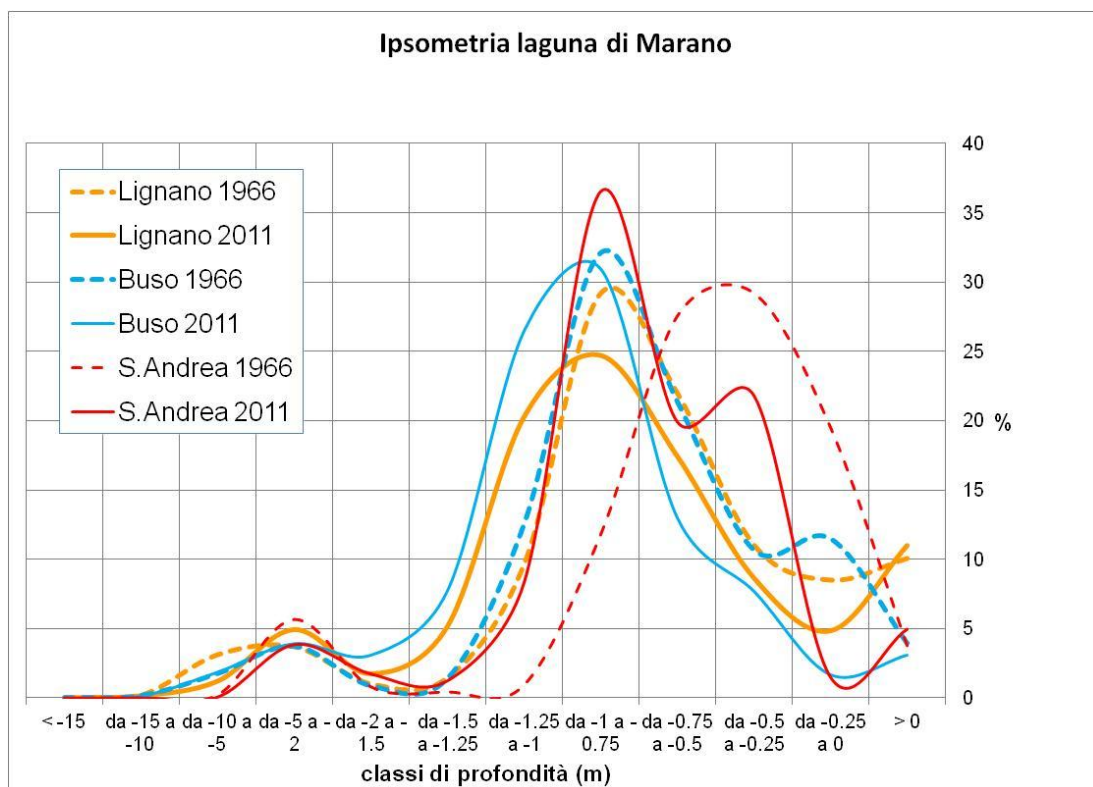


Figura 4.27b - Confronto della distribuzione ipsometrica per il periodo 1966-2011 per i bacini che compongono la laguna di Marano.

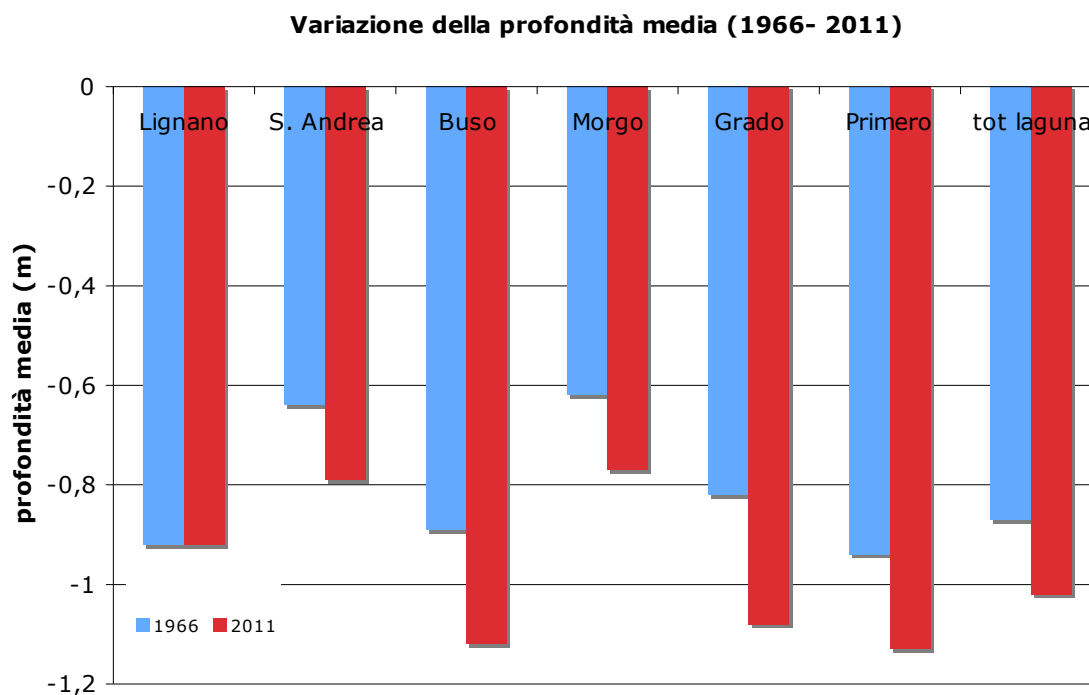


Figura 4.28 - Variazione della profondità media dei bacini.

Da ultimo (tabella 4.10) sono stati messi a confronto i bilanci di bacino (quantità di sedimento guadagnata o persa complessivamente su tutti i fondali analizzati) con quelli relativi all'estensione delle barene, per l'intero periodo di confronto considerato, anche se i due periodi non sono direttamente confrontabili (1966-2011 per i fondali e 1954-2006 per le barene).

Dal bilancio complessivo della laguna sono state eliminate le variazioni dovute alla realizzazione di grandi interventi antropici che hanno determinato una sottrazione di sedimento al sistema quali:

- escavo del canale Aussa Mare nel bacino di Buso pari a -1.011.874 mc
- escavo della darsena di Aprilia Marittima e del relativo canale di accesso nel bacino di Lignano pari a -443.000 mc
- escavo del Canale Moreri attinente alla bonifica di valle Cavarera e della Schiusa in bacino di Grado pari a -1.084.089 mc.

Per il confronto con le barene da queste ultime sono state invece sottratte le quantità relative alle classi di intervento antropico diretto (E5 e A5) e quelle relative alla categoria A3 (*formazione o ampliamento di barene in aree paralagunari recenti*) le cui dinamiche non possono essere ascritte a quelle interne ai bacini.

Dal confronto dei dati così filtrati si ottengono i grafici di figura 4.29 e 4.30 dove si vede che esiste una certa correlazione positiva tra il deficit sedimentario complessivo di ogni bacino e la perdita complessiva di superficie a barene.

	tot laguna	Lignano	S. Andrea	Buso	Morgo	Grado	Primero
Bilancio (mc/anno)	-345 657	-5 302	-19 085	-144 417	-1 618	-162 899	-12 335
Bilancio (mc)	-15 554 547	-238 603	-858 825	-6 498 782	-72 795	-7 330 449	-555 092
grandi interventi antropici (mc)	-2 538 963	-443 000	0	-1 011 874	0	-1 084 089	0
Bilancio senza interventi (mc)	-13 015 584	204 397	-858 825	-5 486 909	-72 795	-6 246 360	-555 092
Bilancio barene (senza E5-A5) ha	22.1	63.4	-9.0	12.2	6.5	-53.1	2.1
Variazione barene fuori bacino (ha)	0	0	0	9.61	1.54	1.85	0
Bilancio barene solo bacini (ha)	9.1	63.4	-9.0	2.6	5.0	-54.9	2.1

Tabella 4.10 - Confronto tra i dati relativi ai bilanci di bacino e quelli relativi alle variazioni areali delle barene.

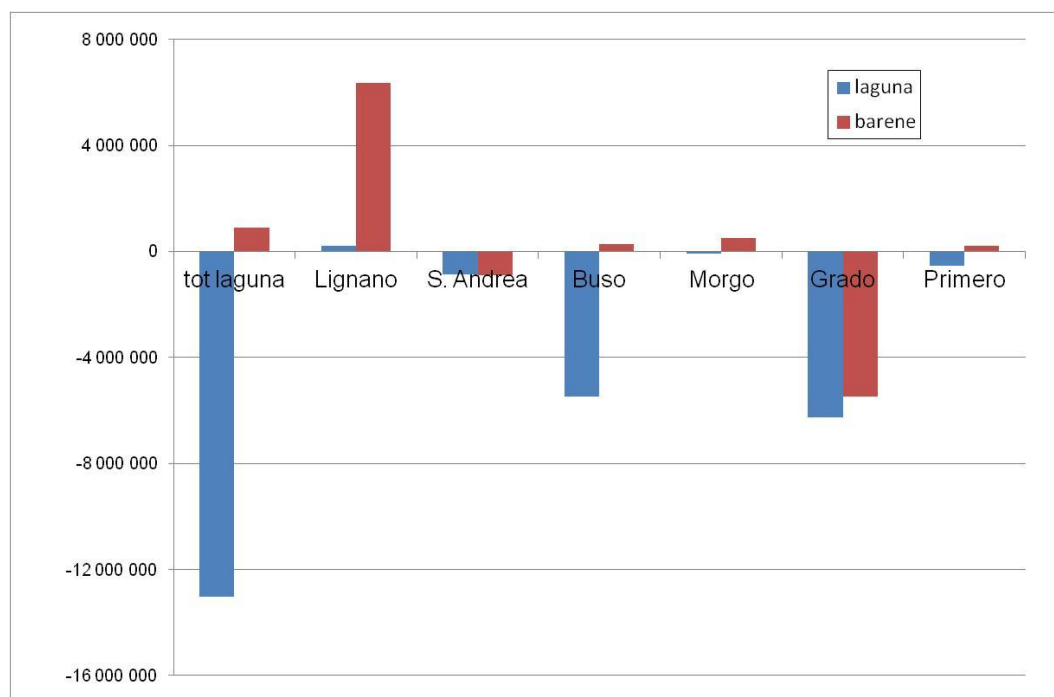


Figura 4.29 - Confronto tra i due bilanci: in blu sono rappresentati i bilanci di bacino (in mc) in rosso le variazioni areali delle barene (i valori in ettari sono stati moltiplicati per 100000 per renderli visivamente più confrontabili).

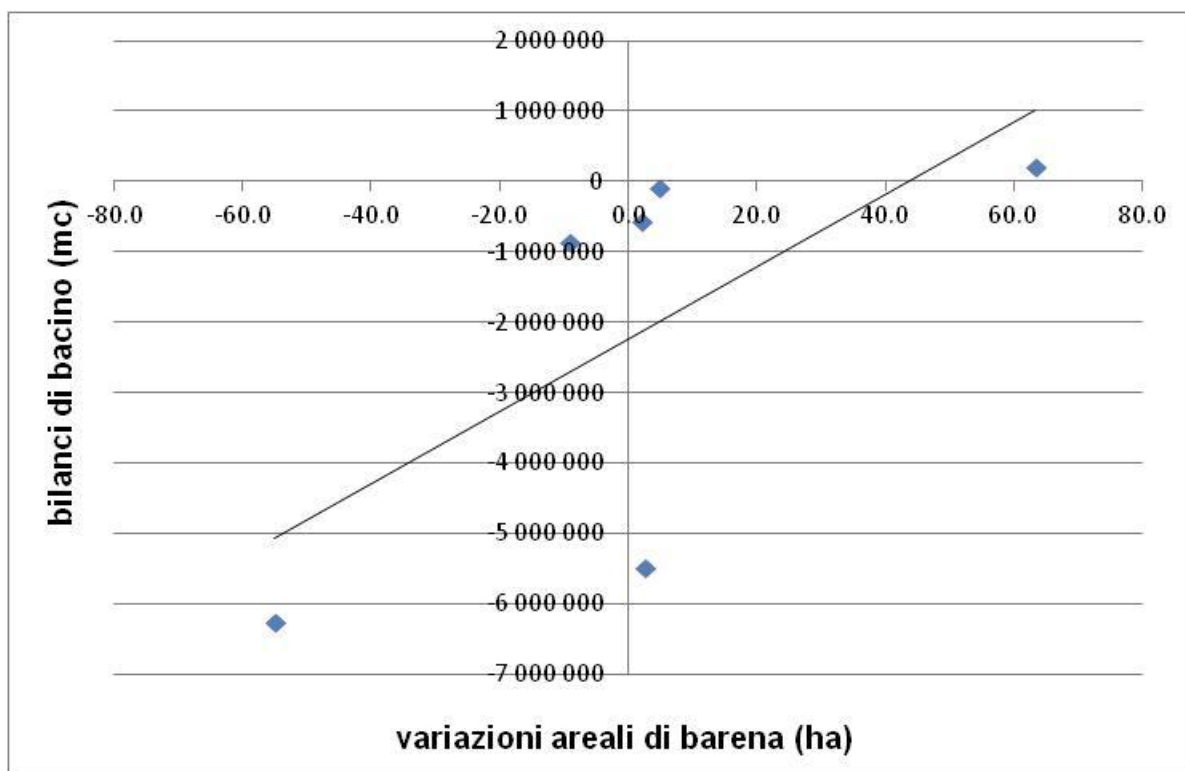


Figura 4.30 – Relazione tra il bilancio della variazioni areali per le barene e quello volumetrico di bacino.

Concludendo questa parte dell'analisi, le principali evidenze ottenute sono:

- Si evidenzia per il periodo 1966-2011 una situazione di deficit sedimentario con un bilancio complessivo negativo per l'intera laguna e per ciascun bacino, con l'unica eccezione costituita dal bacino di Lignano che presenta una sostanziale situazione di equilibrio (modesto budget positivo);
- Tutti i bacini mostrano un significativo aumento della profondità media, che invece si mantiene uguale per il bacino di Lignano;
- Per ciascun bacino si evidenzia una perdita di peculiarità morfologica con approfondimento delle piane tidali e interrimento dei canali; si assiste di contro all'espansione delle aree subtidali (comprese tra -0,75 e -2,00 m);
- Il deficit sedimentario appare più rilevante nei bacini di Buso e Grado;
- È possibile individuare una correlazione positiva tra il deficit complessivo dei singoli bacini e la variazione delle superfici a barena, pur con i limiti di un'analisi applicata a periodi di confronto diversi.

5 LA PROSPETTIVA GESTIONALE

5.1 Principi base

Fino a oggi in laguna di Marano e Grado non sono ancora stati attuati interventi gestionali e/o di protezione e ripristino delle barene, ma tra gli obiettivi gestionali del *Piano di Gestione del SIC / ZPS Laguna di Marano e Grado* è indicata la *conservazione e ricostruzione di barene*.

L'analisi condotta nel presente studio, unitamente a quanto già noto grazie agli studi ad essa correlati (Poldini et al. 2006, Fachin, 2008, Triches et al. 2011), consente di delineare un quadro complessivo abbastanza esaustivo in merito alla situazione morfoevolutiva delle barene e di formulare quindi una prima serie di indicazioni gestionali utili a programmare e progettare eventuali interventi di ripristino e salvaguardia.

A tale scopo si riportano di seguito una serie di considerazioni conclusive tratte dalle analisi eseguite che possono essere assunte, allo stato delle conoscenze attuali, quali principi base ai quali la gestione dovrebbe far riferimento:

1. **Evoluzione del bacino lagunare:** le lagune sono entità in continua evoluzione la cui esistenza e mantenimento nel tempo è il risultato di un equilibrio dinamico tra innalzamento relativo del livello del mare (risultato dell'azione combinata di eustatismo e subsidenza locale) e apporto sedimentario. I due processi lavorano in direzioni opposte: il primo tende a trasformare le lagune in aree marine privandole delle loro peculiarità morfologiche; l'apporto sedimentario invece (qualora sia consistente) tende a interrare completamente le lagune. I segnali evolutivi riscontrati nella laguna, le caratteristiche geografiche e geologiche e i dati morfobatimetrici finora raccolti fanno ritenere che la laguna sia attualmente in una fase di tendenza all'annegamento. Nell'Alto Adriatico infatti è in atto una forte tendenza all'innalzamento del livello del mare. A questo vanno aggiunti gli scarsi apporti solidi fluviali (quasi tutti i fiumi che sfociano in laguna sono di risorgiva), anche se relativamente ad essi mancano dati completi e aggiornati. Inoltre le tendenze evolutive riscontrate quali la perdita di superfici a barena, l'interrimento dei canali e l'approfondimento dei fondali lagunari a bassa profondità (entro i -0.5m), rappresentano una manifestazione della tendenza trasgressiva in atto con progressivo annegamento del bacino lagunare. Se questa tendenza non è contrastabile nella sua globalità, è invece possibile e necessario controllarne e limitarne gli effetti.

2. **Differenziazione delle barene:** 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 necessitino di interventi e strategie gestionali sito-specifiche.
3. **Distruzione delle barene:** la rilevante scomparsa delle barene verificatasi dal 1954 al 2006 a scala di intera laguna va in buona parte attribuita a interventi antropici diretti, che consistono nell'eliminazione di aree a barena in seguito a bonifiche, creazione di casse di colmata, espansione di valli da pesca, costruzione di argini di conterminazione e che sono spesso rappresentati anche da interventi di entità molto piccola.
4. **Tendenza evolutiva delle barene:** i processi erosivi e deposizionali che coinvolgono le barene si esplicano in maniera diversa sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo, a seconda della forzante in atto e delle caratteristiche locali del bacino. Una volta esclusi gli interventi antropici diretti, la quantificazione delle altre forzanti ha consentito di individuare tra le prime cause di perdita di superfici a barena l'annegamento per subsidenza e deficit sedimentario, il moto ondoso naturale, il moto ondoso indotto dai natanti. Dall'analisi è però emerso che non esiste una tendenza evolutiva univoca all'interno di ciascuno dei sei bacini che compongono la laguna. In ciascuno di essi assumono importanza forzanti diverse anche in ragione di un diverso assetto morfologico, delle pratiche di utilizzo e delle modifiche antropiche intervenute nel corso del tempo. Accanto ai fenomeni erosivi sono stati individuati anche importanti segnali di resilienza morfologica del sistema, con ampliamento delle superfici a barena sia nelle aree di apporto fluviale (esempio foci dello Stella, secca di Muzzana), sia in quelle dove la morfologia lagunare consente l'instaurarsi di condizioni protette, adatte alla sedimentazione e quindi alla formazione o all'ampliamento delle superfici a barena.
5. **Complessità morfologica del bacino:** la presenza di una rete di canali principali e secondari, di velme e isole nei singoli bacini, assieme a quella di strutture antropiche (valli da pesca) ne determina la complessità morfologica, che tende a favorire i processi di sedimentazione locali e quindi la preservazione delle barene.
6. **Processi di dinamica costiera:** la vivace dinamica costiera che agisce sulle isole barriera e sui banchi esterni determina comportamenti di segno opposto sull'evoluzione delle barene a essi associate, con erosioni localizzate, ma anche accrescimenti nei bacini paralagunari di recente formazione.
7. **Barene di origine antropica:** le barene G3B e M6B, la cui genesi è da ricondurre alla pratica (in uso un tempo) del riporto del materiale di dragaggio dei canali al bordo degli stessi, non si discostano molto dalle "barene naturali" per quel che riguarda gli aspetti morfologici e vegetazionali, mostrando nello stesso tempo una buona capacità di preservazione nel tempo.

Questi elementi depongono a favore dell'ipotesi di riapplicare le pratiche tradizionali di riuso dei sedimenti, purché con specifiche caratteristiche morfologiche.

5.2 Utilizzo del geodatabase

Con l'obiettivo di individuare in modo corretto aree, priorità e modalità di intervento gestionale sulle barene è in primo luogo necessario definire una serie di elementi, la cui analisi può rappresentare la prima fase all'interno di un processo decisionale lungo e complesso. Esso coinvolge necessariamente anche altre tematiche di tipo ambientale, economico e sociale che esulano dallo scopo del presente lavoro.

Di seguito vengono descritti alcuni di questi elementi, ponendo l'accento (vista la natura della presente ricerca) sugli aspetti sedimentologici e morfologici, i quali andranno adeguatamente integrati con quelli biologici.

Per molti di essi le informazioni complete sono disponibili e interrogabili nel geodatabase che costituisce parte integrante del presente lavoro. In ciascuno dei punti affrontati di seguito è quindi riportato il riferimento ai dati contenuti nel geodatabase o alle altre fonti da me consultate e comunque disponibili.

- A. **Verifica della cronicità del fenomeno erosivo:** è opportuno verificare che il fenomeno erosivo sia in atto da lungo tempo, in questo modo vanno esclusi i fenomeni temporanei che possono essere attribuiti a cause accidentali o a fluttuazioni naturali a breve termine.

FONTE DEL DATO

Geodatabase - dataset "Evoluzione": confronto della tendenza erosiva di ciascuna barena o di ciascun gruppo di barene, nei due intervalli di tempo considerati (1954-1990; 1990-2006).

- B. **Valutazione dell'intensità del fenomeno erosivo:** l'intensità del fenomeno erosivo è un elemento base per la stesura di una lista di priorità di intervento, in quanto andranno ovviamente privilegiati gli interventi in aree in cui il processo erosivo si manifesta in maniera molto intensa ed è tale da mettere a repentaglio in tempi brevi la conservazione di un intero gruppo di barene.

FONTE DEL DATO

Geodatabase - dataset "Sintesi gruppi": superficie persa in percentuale dal 1954 al 2006 per gruppo di barene.

- C. **Riconoscimento della presenza di aree deposizionali:** va verificata la presenza di aree di accrescimento che compensano in tutto o in parte i fenomeni erosivi. La contemporanea presenza di aree erosive e deposizionali permette di identificare i gruppi di barene che mostrano una certa capacità di adattarsi alle modifiche in atto. La mancanza totale di aree di deposizione

mette invece in evidenza una situazione di deficit sedimentario o di idrodinamismo troppo elevato, che non consentono il mantenimento di un equilibrio dinamico.

FONTI DEL DATO

Geodatabase - dataset "Evoluzione": individuazione delle aree stabili, erose e guadagnate nei due intervalli di tempo.

- D. **Individuazione della tipologia erosiva o accrescitiva**: individuare nello specifico le differenti tipologie erosive e accrescitive secondo la classificazione proposta nel presente lavoro (si veda cap. 4) può essere un valido ausilio (come vedremo meglio al paragrafo 5.3) per scegliere le strategie e le tecniche da adottare caso per caso.

FONTI DEL DATO

Geodatabase - dataset "Evoluzione": individuazione delle forzanti attribuite a ciascuna area persa o guadagnata e della forzante prevalente di ciascun gruppo.

- E. **Individuazione della tipologia di margini**: identificare nello specifico di ciascun barena i margini erosivi e quelli deposizionali rappresenta un elemento importante per l'individuazione localizzata delle aree di intervento e la scelta delle tecniche di intervento da adottare.

FONTI DEL DATO

Geodatabase - dataset "Evoluzione - Margini": individuazione dei margini stabili, in erosione e in avanzamento.

- F. **Individuazione dei gradi di libertà della barena**: la presenza di elementi rigidi (quali argini di conterminazione, argini di valli da pesca, canali navigabili) può limitare la possibilità di migrare della barena in risposta al mutare delle condizioni ambientali o al protrarsi delle attuali tendenze erosive.

FONTI DEL DATO

CARTOGRAFIA CGT DELLA REGIONE FVG, CARTA BATIMETRICA DELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO: individuazione dei manufatti antropici e dei canali principali all'interno del bacino lagunare.

- G. **Individuazione della batimetria delle aree adiacenti**: la presenza di diverse categorie batimetriche e morfologiche (piana subtidale, piana tidale, canale) nelle aree adiacenti ai margini delle barene sui quali si vuole intervenire, influisce sulle dinamiche di scambio sedimentario con la barena e condiziona fortemente le possibilità e le scelte di intervento.

FONTI DEL DATO

CARTA BATIMETRICA DELLA LAGUNA DI MARANO E GRADO: individuazione della batimetria nelle aree adiacenti ai margini delle barene.

5.3 Strategie e tecniche possibili

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). 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 fino alle barriere frangiflutto galleggianti (McCartney 1985; Saccomani, 2009)

Aumentare la disponibilità di sedimento

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, o indiretta in aree adiacenti, sfruttando 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'importazione 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 ridistribuzione, 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 persi 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 subtidale 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.

5.4 Applicazione ai contesti evolutivi individuati

In base alle differenti tipologie erosive individuate e descritte al capitolo 4 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 5.1.

Ciascuna delle tecniche proposte richiede un attento studio morfodinamico, idrodinamico e vegetazionale prima dell’eventuale intervento e un monitoraggio nella fase successiva.

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.

Nel caso 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 in qualche modo 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 sviluppa 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.

Erosione delle barene causata da processi di dinamica costiera (E4)

Questo stile evolutivo viene generato da particolari dinamiche costiere (come meglio dettagliato al capitolo 4) ed è stato riscontrato in un solo caso (presso la bocca tidale di S.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.

Tipologia erosiva	Strategie	Tecniche possibili
E1	<ul style="list-style-type: none"> – Do nothing – Aumentare la disponibilità di sedimento – Favorire la sedimentazione locale 	<ul style="list-style-type: none"> – Ricarica di sedimento diretta o indiretta in aree adiacenti – Protezioni distaccate con creazione di aree ad <i>acque calme</i> – Piantumazioni
E2	<ul style="list-style-type: none"> – Do nothing – Proteggere i margini dal moto ondoso diretto 	<ul style="list-style-type: none"> – Lasciare migrare la barena – Protezioni in aderenza – Protezione distaccate con creazione di aree ad <i>acque calme</i> – Protezioni <i>soft</i> (fascinate, buzzoni) – Protezioni soffolte
E3	<ul style="list-style-type: none"> – Do nothing – Proteggere i margini dal moto ondoso diretto 	<ul style="list-style-type: none"> – Lasciar migrare la barena – Protezioni in aderenza – Protezione distaccate con creazione di aree ad <i>acque calme</i> – Protezioni <i>soft</i> (fascinate, buzzoni)
E4	<ul style="list-style-type: none"> – Do nothing 	
E5	<ul style="list-style-type: none"> – Impedire lo sviluppo di ulteriori interventi antropici diretti 	<ul style="list-style-type: none"> – Vincoli alla pianificazione territoriale

Tabella 5.1 – Tabella che associa a ogni tipologia erosiva differenti approcci e tecniche gestionali.

5.5 La ricostruzione di barene

La ricostruzione integrale di aree a barena può, in linea di principio, 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 modalità di intervento, per la localizzazione e costruzione di nuovi sistemi di barene, non solo in considerazione delle stesse quali aree emerse 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:

- La ricostruzione deve riguardare in preferenza aree dove le barene erano già presenti nel passato.
- È preferibile che la ricostruzione avvenga in aree già costituite da piane tidali (tra 0 e -0,5m).
- L'area di sversamento deve rispettare il più possibile la morfologia preesistente senza interrompere canali o ghebi e modificare il flusso e riflusso mareale.
- La collocazione del sedimento deve rispettare il più possibile le caratteristiche morfologiche funzionali delle barene, che già esistono in aree adiacenti o all'interno di quel bacino.
- Le quote massime (da prevedere dopo che è avvenuto una naturale prima compattazione) devono essere comprese tra 0,40 e 0,50m sul l.m.m..
- 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 S. Andrea).
- Non vanno previste protezioni rigide se non lungo i canali lagunari a intensivo transito di natanti, 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).

6 CONCLUSIONI

Questo lavoro affronta, per la prima volta in maniera organica, lo studio delle barene della laguna di Marano e Grado. Gli obiettivi che ci si era prefissati erano sia di tipo scientifico che applicativo. Da un lato si voleva fornire una prima caratterizzazione morfologica, evolutiva e sedimentologica delle barene, funzionale alla conoscenza di base e alla loro gestione e conservazione in un ambiente di grande importanza naturalistica e paesaggistica, ma ancora carente di dati. In secondo luogo si intendeva fornire un contributo al dibattito relativo al comportamenti degli ambienti lagunari in generale e delle barene in particolare in contesti trasgressivi e fortemente condizionati dall'azione antropica come quello Alto Adriatico.

Il lavoro è stato svolto attraverso due differenti approcci: un'analisi puntuale in 13 aree campione, compiuta attraverso rilievi topografici, analisi di foto aeree e campionamento sedimentologico e un'analisi a macroscale sull'intera laguna. Quest'ultima ha utilizzato come base di partenza un dataset già disponibile costituito dalla digitalizzazione dei contorni delle barene di tre levate di foto aeree (1954, 1990, 2006) e ha compreso una serie di analisi in ambiente GIS (analisi complessiva delle variazioni delle superfici, analisi per gruppi, analisi topologica delle singole superfici) e l'applicazione di diverse metodologie di classificazione.

Grazie alla prima parte del lavoro si sono potute raccogliere una serie di informazioni morfologiche, evolutive e sedimentologiche che, assieme a quanto noto dai pochi lavori pregressi, sono state di fondamentale supporto per l'individuazione di differenti tipologie di barene e per l'interpretazione dei fenomeni evolutivi individuati grazie all'analisi a macroscale.

Prendendo spunto da classificazioni morfogenetiche già esistenti (Oertel & Woo, 1994) sono state individuate, a scala di intera laguna, cinque categorie di barene ciascuna con proprie caratteristiche morfologiche e sedimentologiche: barene di margine lagunare o di delta endolagunare, barene di retrobarriera, barene di margine di canale, barene in aree paralagunari recenti, barene isolate. La loro descrizione, pur necessitando di essere ulteriormente approfondita grazie a una più ampia casistica sul campo, ha permesso di delineare una peculiare caratterizzazione morfologica di ciascuno dei sei bacini che compongono la laguna: Lignano, S.Andrea, Buso, Morgo, Grado e Primero.

Inoltre è stata elaborata e applicata alle diverse scale di analisi un'originale classificazione morfoevolutiva che identifica differenti tipologie erosivo - accrescitive associate ad altrettante forzanti: 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). La classificazione è stata applicata a ciascuna delle aree individuate come perse o guadagnate nei due periodi di tempo considerati, attribuendo così una forzante a ciascuna variazione.

Si è verificato in questo modo che la rilevante perdita di barene (-144 ha pari al 16% delle barene presenti nel 1954) avvenuta per l'intera laguna è in realtà il risultato di una sommatoria di variazioni di segno opposto che in gran parte si compensano a vicenda, confermando che le barene sono soggette nel tempo a variazioni anche vistose, che però necessitano di essere interpretate correttamente. In questo contesto il fenomeno più rilevante è stato però 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).

Una volta eliminati dal computo gli interventi antropici il fenomeno erosivo appare nel complesso molto più contenuto, con un bilancio nettamente positivo per il primo periodo (+37 ha) e debolmente negativo per il secondo (-15 ha), soprattutto grazie ai fenomeni accrescitivi peculiari di alcuni bacini.

Considerando tutte le aree coinvolte il fenomeno erosivo che si manifesta con rilevanza maggiore sull'intero intervallo di tempo è l'annegamento (categoria E1 con -181 ha). La complessa interazione tra le forzanti regionali (eustatismo e subsidenza) e quelle locali (ratei di sedimentazione e autocompattazione) fa sì che il processo si presenti con una certa variabilità, sia in termini di espressione morfologica, sia di entità alle differenti scale di lavoro (bacino, gruppo di barene, singola barena). Seguono, in termini di 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.

I fenomeni accrescitivi si presentano abbastanza rilevanti nel primo periodo (in totale le aree guadagnate sono pari a +242 ha), quando si esplicano soprattutto grazie all'apporto fluviale (categoria A1 con +77 ha) in corrispondenza di una vistosa fase di adattamento, che in un momento immediatamente successivo alla bonifica di un'estesa area lagunare, aveva determinato la formazione di nuove vaste superfici a barena nel bacino di Lignano. Nel secondo periodo le variazioni positive si riducono fortemente e si manifestano principalmente nei bacini che hanno un apporto fluviale (A1 con +18.5 ha quasi esclusivi del bacino di Lignano) o un'elevata complessità morfologica. Questa infatti limita l'esplicarsi delle forzanti erosive e favorisce i processi di sedimentazione dal carico sospeso apportato dalle correnti tidali in aree protette all'interno della laguna (A2 con +38 ha), nei bacini paralagunari di recente formazione (A3 con +8 ha) o in valli da pesca abbandonate (A4 con 5.5 ha). Questi fenomeni sono spesso in grado di compensare in termini di superfici guadagnate, le perdite dovute all'erosione e sono un'importante espressione della capacità di resilienza del sistema barenale.

Il comportamento dei singoli bacini non appare dunque coerente tra i due periodi e non è sincrono a quello dell'intera laguna, a testimonianza del fatto che le forzanti locali prevalgono su quelle generali, quali l'innalzamento del livello del mare. Poiché l'intervallo di tempo indagato risente sicuramente dei grandi cambiamenti avvenuti per interventi antropici nel periodo immediatamente precedente al 1954, ma anche di interventi durante il periodo stesso, per confermare le tendenze individuate sarà necessario proseguire l'indagine nel tempo con l'analisi di dataset più recenti.

Per confrontare il comportamento delle barene con quello della laguna nel suo complesso, è stato preso in considerazione un inedito dataset relativo al confronto quantitativo tra le batimetrie del 1966 (Dorigo, 1966) e quelle del 2011 (Triches et al., 2011). Questi dati mettono in evidenza un bilancio sedimentario negativo per l'intera laguna e anche per i singoli bacini, ad eccezione di quello di Lignano, che mostra un bilancio in sostanziale equilibrio. L'analisi delle ipsometrie dei singoli bacini conferma la forte differenziazione morfologica imputabile alla loro differente origine e maturità, e mostra una generalizzata tendenza all'approfondimento, accompagnata da una semplificazione morfologica (entrambi fenomeni già verificati anche se in maniera più rilevante per la Laguna di Venezia da Sarretta et al., 2007), che trova in parte un accordo con la tendenza erosiva delle barene.

I dati relativi alle barene sono stati organizzati in un geodatabase che vuole essere uno strumento applicativo oltre che di ulteriore analisi scientifica, messo a disposizione dell'ARPA Friuli Venezia Giulia che è stata in parte sponsor di questo progetto di ricerca.

Proprio con finalità applicative sono state redatte una serie di indicazioni e proposte di carattere gestionale comprendenti: una serie di principi base ricavati dai risultati dello studio intesi come prime linee guida gestionali per le barene; una proposta di utilizzo del geodatabase attraverso una serie di interrogazioni possibili, utili a individuare priorità di intervento e informazioni a supporto del processo decisionale; infine uno schema di lavoro che associa filosofie e tecniche gestionali a ciascuna delle tipologie erosivo - accrescitive individuate.

BIBLIOGRAFIA

- Acquavita A., Covelli S., Emili A., Berto D., Faganeli J., Giani M., Horvat M., Koron N., Rampazzo F., 2012. Mercury in the sediments of the Marano and Grado Lagoon (Northern Adriatic Sea): Sources, distribution and speciation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 113: 20-31.
- Adam P., 2002. Saltmarshes in a time of change. *Environmental Conservation*, 29 (1): 39-61.
- 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. Apparati 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.
- Albani A.D., Favero V., Serandrei Barbero R., 1984. Apparati intertidali ai margini di canali lagunari. Studio morfologico, micropaleontologico e sedimentologico. *Rapporti e Studi Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti*, IX: 137-161.
- Allen, J.R.L., 1993. Muddy alluvial coasts of Britain: field criteria for shoreline position and movement in the recent past. *Proceedings of the Geologists' Association*, 104 (4): 241-262.
- 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., Umgieser G., Tosi L., Townend I.H., 2010. The coastal morphodynamics of Venice lagoon, Italy: an introduction. *Continental Shelf Science*, 30: 837-846.
- Antonoli 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.
- Arfi R., Guiral D., Bouvy M., 1993. Wind induced resuspension in a shallow tropical lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36: 587-604.
- Baily B. & Pearson W., 2007. Change detection mapping and analysis of salt marsh areas of central Southern England from Hurst Castle Spit to Pagham Harbour. *Journal of Coastal Research*, 23 (6): 1549-1564.
- Bartholdy J., 2012. Salt marsh sedimentation. In: *Principles of tidal sedimentology* (Davis R.A.Jr. & Dalrymple R.W Eds.), Springer: 151-185 p.
- Baumann R.H., Day J.W., Miller C.A., 1984. Mississippi deltaic wetland survival: sedimentation versus coastal submergence. *Science*, 224: 1093-1095.
- Belli M., Colizza E., Fanzutti G.P., Finocchiaro F., Marocco R., Melis R., Piani R., Sansone U., 1996. Stato delle conoscenze e programmi futuri sulle indagini sedimentologiche e radioecologiche nella Laguna di Marano e Grado. *10 Anni da Chernobyl: Ricerche in radioecologia, monitoraggio ambientale e radioprotezione, Trieste marzo 1996, Atti*: 151-157.
- Bettinetti A., Mattarolo F., Silva P., 1995. Reconstruction of saltmarshes in the Venice Lagoon. In: E. Özhan (ed.) *Proc. MEDCOAST 94 Conf., 22-27 October 1995*: 921-935.
- Bird E., 2000. *Coastal geomorphology. An introduction*. John Wiley and Son Ltd, Chichester, U.K.: 322 pp.
- Blume H.P. & Mueller Thomsen U., 2007. A field experiment on the influence of the postulated global climate change on coastal marshland soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170: 145-156.
- Boggs S.Jr., 2006. *Principles of sedimentology and stratigraphy*. Pearson Prentice Hall, 4° Edition: 662 pp.
- Bonometto L., 2003. *Analisi e classificazione funzionale delle barene e delle tipologie di intervento sulle barene*. Comune di Venezia. 232 pp.

- Boorman L.A., 1995. Sea level rise and the future of the British coast. *Coastal Zone Topics: Process, Ecology and Management*, 1: 10–13.
- Boorman L.A., 2003. *Saltmarsh review. An overview of coastal saltmarshes, their dynamic and sensitivity characteristics for conservation and management*. JNCC Report, n° 334: 114 pp.
- 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., 1970. Provenienza, trasporto e accumulo dei sedimenti recenti nelle lagune di Marano e Grado e nei litorali tra i fiumi Isonzo e Tagliamento. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 9: 281-329.
- Brambati A., 1972. Clay mineral investigation in the Marano and Grado Lagoons (Northern Adriatic Sea). *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 91: 315-323.
- 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 dell'Ambiente, Servizio dell'Idraulica, Trieste: 174 pp.
- Brambati A. & Venzo G.A., 1967. Recent sedimentation in the Northern Adriatic Sea between Venice and Trieste. *Studi Trentini di Scienze Naturali*, sez.A, 44: 202-274.
- 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.
- Burla I. & Fontolan G., 2003. The impact of clam fishing dredges on the Adriatic lagoons. *Proc. VI International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 03, Ravenna 7-11 Oct. 2003*, vol. 2: 959-970.
- Cahoon D.R., Reed D.J., Day Jr. J.W., 1995. Estimating shallow subsidence in microtidal salt marshes of the southeastern United States: Kaye and Barghoorn revisited. *Marine Geology*, 128: 1-9.
- 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.
- Carrera F., Cerasuolo M., Tomasin A., Canestrelli P., 1995. La nebbia a Venezia nel quarantennio 1951-1990. Analisi comparata degli andamenti di visibilità, pressione, temperatura e vento. *Rapporti e Studi Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti*, XII: 235-271.
- Carter R.W.G., 1988 - *Coastal Environments*. Academic Press, London: 617 pp.
- Castillo J.M., Luque C.J., Castellanos E.M., Figueroa M.E., 2000. Causes and consequences of salt-marsh erosion in an Atlantic estuary in SW Spain. *Journal of Coastal Conservation*, 6: 89-96.
- Cavaleri L., 1980. Sediment transport in shallow lagoons. *Il Nuovo Cimento*, 3 (5): 527-540.
- Cecconi G., 1995. Un programma integrato per proteggere le barene. *Quaderni trimestrali del Consorzio Venezia Nuova*, 5.
- Cecconi G., Codato F., Nascimbeni P., Mattarolo F., 1998. Valore ambientale delle barene artificiali. *Quaderni Trimestrali del Consorzio Venezia Nuova*, 1.
- Colenutt, A., 2001. *Saltmarsh management techniques, a review*. New Forest District Council, Coast Protection Group: 29 pp.
- Comel A., 1954. Monografia sui terreni della pianura friulana. *Nuovi Annali Istituto Chim. Agr. Sperim. di Gorizia*, V: 168p.
- Covelli S., Piani R., Acquavita A., Predonzani S., Faganelli J., 2007. Transport and dispersion of particulate Hg associated with a river plume in coastal Northern Adriatic environments. *Marine Pollution*, 55: 436-450.

- Covelli S., Langone L., Acquavita A., Piani R., Emili A., 2012. Historical flux of mercury associated with mining and industrial sources in the Marano and Grado Lagoon (northern Adriatic sea). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 113: 7-19.
- Cox R., Wadsworth R.A., Thomson A.G., 2003. Long-term changes in salt marsh extent affected by channel deepening in a modified estuary. *Continental Shelf Research*, 23: 1833-1846.
- Fiedler S. & Sommer M., 2004. Water and redox conditions in wetland soils – their influence on pedogenic oxides and morphology. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 326–335.
- Dashgard E. & Gingras M.K., 2005. Facies architecture and ichnology of recent salt-marsh deposits: Waterside Marsh, New Brunswick, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 75: 596-607.
- Day J., Ibáñez C., Scarton F., Pont D., Hensel P., Day J., Lane R., 2011. Sustainability of mediterranean deltaic and lagoon wetlands with sea-level rise: the importance of river input. *Estuaries and Coasts*, 34: 483-493.
- Day J.W.Jr., Rismondo A., Scarton F., Are D., Cecconi G., 1998. Relative sea level rise and Venice Lagoon wetlands. *Journal of Coastal Conservation*, 4: 27-34.
- Day J.W.Jr., Rybczyka J., Scarton F., Rismondo A., Are D., Cecconi G., 1999. Soil accretionary dynamics, sea-level rise and the survival of wetlands in Venice lagoon: a field and modeling approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49: 607–628.
- Davis R.A., 2012. Tidal signatures and their preservation potential in stratigraphic sequences. In: *Principles of tidal sedimentology* (Davis R.A.Jr. & Dalrymple R.W Eds.), Springer, 35-55p.
- 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.
- DeLaune, R.D., Patrick, W.H., Van Breemen, N., 1990. Processes governing marsh formation in a rapidly subsiding coastal environment. *Catena*, 17: 227-288.
- Desio A., 1922. Le variazioni della foce del fiume Isonzo. *Rivista Geologica Italiana*, 29: 249-268.
- Dijkema K.S., 1987. Geography of the Salt Marshes in Europe. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 31: 489–499.
- 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, 155: 231 pp.
- Dorigo L., 1966. *La carta idrografica della Laguna di Grado e Marano*. Magistrato delle Acque, Ufficio Idrografico, Venezia.
- 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 A.A. 2007/2008: 174pp.
- 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.
- Favero V., Serandrei Barbero R., 1980. Origine ed evoluzione della laguna di Venezia, Bacino meridionale. *Lavori della Società Veneziana di Scienze Naturali*, 5: 49-71.
- Favero V., Serandrei Barbero R., 1983. Oscillazioni del livello del mare ed evoluzione paleoambientale della Laguna di Venezia tra Torcello e il margine lagunare. *Lavori della Società Veneziana di Scienze Naturali*, 8: 83-102.

- Ferla M, Cordella M., Michielli L., Rusconi A., 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: 65-76.
- Ferrarin C., Umgiesser G., Bajo M., Bellafiore D., De Pascalis F., Ghezzi 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.
- Fiedler S. & Sommer M., 2004. Water and redox conditions in wetland soils – their influence on pedogenic oxides and morphology. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 326–335.
- 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. 2007a. Coastal vulnerability assessment: the Grado and Marano barrier islands. *Convegno Nazionale GeoItalia 2007, Rimini 12-14 sett. 2007, Book of Abstracts, Epitome*, 2: 37 p..
- Fontolan G., Pillon S., Delli Quadri F., Bezzi A., 2007b. Sediment storage at tidal inlets in northern Adriatic lagoons: ebb-tidal delta morphodynamics, conservation and sand use strategies. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 75 (1-2): 261-277.
- Gatto F. & Marocco R., 1992. Caratteri morfologici ed antropici della Laguna di Grado e Marano (Alto Adriatico). *Gortania*, 14: 19-42.
- Hartig E.K., Gornitz V., Kolker A., Mushacke F., Fallon D., 2002. Anthropogenic and climate-change impacts on salt marshes of Jamaica Bay, New York City. *Wetlands*, 22 (1): 71-89.
- Kearney M.S., Grace R.E., Stevenson J.C., 1988. Marsh loss in Nanticoke Estuary, Chesapeake Bay. *Geographical Review*, 78 (2): 205-220.
- Kent D.V., Rio D., Massari F., Kukla G., Lanci L., 2002. Emergence of Venice during the Pleistocene. *Quaternary Science Reviews*, 21: 1719–1727.
- 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.
- Lang F., Schimpel T., Scozzafava T., Disselhoff T., Bonometto L., 2006a. Morfogenesi degli ambienti intertidali. In *Atlante della Laguna, Venezia tra terra e mare* (Guerzoni S. & Tagliapietra D. Eds), Marsilio: 28-29 p.
- Lang F., Schimpel T., Scozzafava T., Disselhoff T., Bonometto L., 2006b. Ossidi di ferro quali indicatori pedologici delle barene. In *Atlante della Laguna, Venezia tra terra e mare* (Guerzoni S. & Tagliapietra D. Eds), Marsilio: 32-33 p.
- Lang F., von der Lippe M., Schimpel T., Scozzafava Jaeger T., Straub, 2010. Topsoil morphology indicates bio-effective redox conditions in Venice salt marshes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87: 11-20.
- 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., 1995. Sediment distribution and dispersal in northern Adriatic lagoons (Marano and Grado paralic system). *Giornale di Geologia*, 57: 77-89.
- 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.
- Marshall D.R., 1962. The morphology of the Upper Solway Salt Marshes. *Scottish Geographical Magazine*, 78: 81-99.
- Mccartney, B.L., 1985. Floating breakwater design. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 111 (2): 304-318.
- Molinaroli E., Guerzoni S., Sarretta A., Masiol M., Pistolato M., 2009. Thirty-year changes (1970 to 2000) in bathymetry and sediment texture recorded in the lagoon of Venice sub-basins, Italy. *Marine Geology*, 258:115–125.
- Nielsen N. & Nielsen J., 2002. Vertical growth of a young barrier salt marsh, Skallingen, SW Denmark. *Journal of Coastal Research*, 18 (2): 287-299.
- Oertel G.F. & Woo H.J., 1994. Landscape classification and terminology for marsh in deficit coastal lagoons. *Journal of Coastal Research*, 10 (4): 919-932.
- Orson R.A., Warren R.S, Niering W.A., 1987. Development of a tidal marsh in a New England river valley. *Estuaries*, 10 (1): 20-27.
- Pethick J., 1981. Long-term accretion rates on tidal salt marshes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51 (2): 571-577.
- Pethick J., 1984. *An introduction to coastal geomorphology*. Edward Arnold, London: 260 pp.
- Petranic, 2010. *Bioaccumulo di metalli pesanti in Sarcocornia fruticosa e Limonium vulgare nelle barene della laguna di Marano e Grado*. Tesi inedita, Università degli Studi di Trieste A.A. 2010-2011: 148pp.
- Pillon S., Fontolan G., Bezzi A., Burla I., Tessari U., Simeoni U., Zamariolo A., Tromellini E., Gabellini M., 2003. A GIS-based morphological evolution of the Venice Lagoon. In: *Proc. VI International Conference on Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST03*, 2: 1269–1280 p.
- 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.
- 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: 117 pp.
- Pye K. & French P.W., 1993. *Erosion and accretion processes on British Salt Marshes*. Cambridge Environmental Research Consultants, Cambridge: 5 vol.
- Olf H., De Leeuw J., Bakker J. P., Platterink R. J., Wijnen H. J., 1997. Vegetation succession and herbivory in a salt marsh: changes induced by sea level rise and silt deposition along an elevational gradient. *Journal of Ecology*, 85 (6): 799-814.
- Ravens T.M., Thomas R.C., Roberts K.A., Santschi P.H., 2009. Causes of salt marsh erosion in Galveston Bay, Texas. *Journal of Coastal Research*, 25 (2): 265-272.
- Ravera O., 2000. The lagoon of Venice: the result of both natural factors and human influence. *Journal of Limnology*, 59 (1): 9-30.
- Reed D.J., 1988. Sediment dynamics and deposition in a retreating coastal marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 26: 67-79.
- Reed D.J., 1995. The response of coastal marshes to sea-level rise: survival or submergence. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20: 39-48.
- Rizzetto F. & Tosi, L. 2011. Aptitude of modern salt marshes to counteract relative sea-level rise, Venice Lagoon (Italy). *Geology*, 39 (8): 755-758.

- Rusconi, 1987. *Variazione delle superfici componenti il bacino lagunare*. Ufficio idrografico di Venezia, Pubblicazione 160.
- Saccomani, C., 2009. *Studio sperimentale, su modello fisico, dell'efficienza di frangiflutti galleggianti*. - Tesi di laurea inedita, 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., 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.
- Schwimmer R.A. & Pizzuto, J.E., 2000. A model for the evolution of marsh shorelines. *Journal of Sedimentary Research*, 70 (5): 1026–1035.
- Sfriso A., Facca C., Marcomini A., 2005. Sedimentation rates and erosion processes in the lagoon of Venice. *Environment International*, S.I. 31: 983–992.
- Shepard F.P., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24: 151-158.
- 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.
- Ursino N., Sivestri S., Marani M., 2004. Subsurface flow and vegetation patterns in tidal environments. *Water Resources Research*, 40: W05115.
- van der Wal D. & Pye K., 2004. Patterns, rates and possible causes of saltmarsh erosion in the Greater Thames area (UK). *Geomorphology*, 61: 373-391.
- van Straaten L.M.J.U. & Kuenen Ph.H., 1957. Accumulation of fine grained sediments in the Dutch Wadden sea. *Geol. en Mijnbouw*, 19: 329-354.
- van Straaten L.M.J.U. & Kuenen Ph.H., 1958. Tidal actions as a cause of clay accumulation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 28 (4): 406-413.
- Wentworth C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30: 377-392.

RINGRAZIAMENTI:

Questo lavoro è frutto del contributo e della collaborazione di molte persone che desidero ringraziare:

- L'ARPA Friuli Venezia Giulia per aver sostenuto finanziariamente e logisticamente questo progetto di ricerca, in particolare il Dott. Giorgio Mattassi e il Dott. Alessandro D'Aietti per il loro appoggio e il capitano Antonio Tortora per il prezioso supporto in laguna;
- il Dott. Ivan Raddi, l'Ing. Taverna e il custode dell'Isola di S. Andrea Giovanni per aver agevolato le operazioni di rilievo e campionamento con il loro supporto logistico;
- il gruppo di lavoro della ora non più esistente Autorità di bacino regionale del Friuli Venezia Giulia nelle persone di Antonella Triches, Marco Lipizer e Renato Villalta con la collaborazione dei quali sono stati elaborati i dati, tuttora in gran parte inediti, utilizzati per il confronto con i bilanci di bacino;
- il tecnico del Dipartimento di Matematica e Geoscienze Mauro Bussi che ha eseguito le analisi sedimentologiche;
- il gruppo di ricerca del *Mercury Lab* del Dipartimento di Matematica e Geoscienze per il supporto in campagna, le utili discussioni, la sincera amicizia e la disponibilità: Stefano Covelli, Andrea Emili, Elisa Petranich;
- gli studenti (oggi non più tali) che hanno collaborato e sono stati prezioso aiuto in campagna e in laboratorio, ma hanno anche dato stimolo alla discussione e al miglioramento: Pietro Bulfon, Elisa Pellegrini, Andrea Ulliani, Luca Spizzamiglio;
- infine il “mio” gruppo di ricerca del *Coastal group* senza il cui supporto e contributo pratico, scientifico e umano questo lavoro non sarebbe stato possibile: Giorgio Fontolan, Simone Pillon, Davide Martinucci, Chiara Popesso.