REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA
DIREZIONE CENTRALE AMBIENTE ED ENERGIA
AREA TUTELA GEOLOGICO-IDRICO-AMBIENTALE

dipartimento di matematica e geoscienze

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Studio di assetto morfologico e ambientale del Banco della Mula di Muggia

Accordo attuativo di collaborazione stipulato in data 02/12/2016 tra la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia - Direzione Centrale ambiente ed energia e l'Università degli Studi di Trieste - Dipartimento di Matematica e Geoscienze per lo studio delle evoluzioni della zona costiera adiacente al Comune di Grado con particolare riferimento alla zona delle spiagge e all'antistante Banco della Mula di Muggia.

Relazione finale
Febbraio 2018

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA
DIREZIONE CENTRALE AMBIENTE ED ENERGIA
AREA TUTELA GEOLOGICO-IDRICO-AMBIENTALE

dipartimento di matematica e geoscienze

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Studio di assetto morfologico e ambientale del Banco della Mula di Muggia

Accordo attuativo di collaborazione stipulato in data 02/12/2016 tra la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia - Direzione Centrale ambiente ed energia e l'Università degli Studi di Trieste - Dipartimento di Matematica e Geoscienze per lo studio delle evoluzioni della zona costiera adiacente al Comune di Grado con particolare riferimento alla zona delle spiagge e all'antistante Banco della Mula di Muggia.

Relazione finale
Febbraio 2018

Gruppo di lavoro Servizio Geologico:

Fabrizio Fattor (Direttore del Servizio)

Antonio Bratus

Gruppo di lavoro
Dipartimento di Matematica e Geoscienze:

Giorgio Fontolan (Coordinatore scientifico)

Annelore Bezzi
Giulia Casagrande
Davide Martinucci
Simone Pillon
Massimo Tondello (Hydrosoil s.r.l.)

Indice

Premessa ... 3
1. Inquadramento ... 4
1.1. Caratteristiche del sistema costiero ... 4
1.2. Condizioni meteo –marine ... 7
1.2.1. Fetch geografici ed efficaci ... 7
1.2.2. Regime anemologico ... 8
1.2.3. Marea ... 10
1.2.4. Moto ondoso ... 14
1.3. Il contesto evolutivo: innalzamento del livello del mare ... 18
2. Strumenti conoscitivi ... 20
2.1. Studi ... 20
2.2. Cartografia ... 23
2.3. Foto aeree ... 28
2.4. Rilievi topo-batimetrici dei litorali ... 30
2.5. Sedimentologia ... 35
3. Analisi degli aspetti morfologico – evolutivi ... 37
3.1. Evoluzione del litorale su base cartografica (periodo 1800-1949) ... 37
3.1.1. 1798 – 1805 Kriegskarte von Zach ... 38
3.1.2. 1822 -1824 Carta di cabotaggio del mare Adriatico ... 39
3.1.3. 1830 Carta Corografica del Catasto Franceschino ... 41
3.1.4. 1849 Carta topografica della Venezia ... 42
3.1.5. Carta Franzisco – Josephinische Landesaufnahme (1869-1887). ... 42
3.1.6. 1894 Carta topografica del Militargeographisches Institut ... 45
3.1.7. 1915-1917 Carta IGM (40IISE e 40IIISO) ... 48
3.1.8. 1927 Carta IGM (40IISE1927) e carta I.I.M. (Marina di Grado) ... 50
3.1.9. 1938/39 Carta IGM (40IISE1938 e 40IIISO1938)) e carta I.I.M (Marina di Grado 1939) 52
3.1.10. 1949 Carta IGM (40IISE1949 e 40IIISO 1949) ... 55
3.2. Evoluzione morfologica periodo 1954 – 2014 ... 56
3.2.1. 1954 ... 57
3.2.2. 1978 ... 60
3.2.3. 1985 ... 68
3.2.4. 2007 ... 71
3.2.5. 2014 ... 76
3.2.6. Foto satellitari recenti ... 78

3.3. Sintesi dell'evoluzione del litorale 79
4. Stima quantitativa delle tendenze erosive / deposizionali e bilancio sedimentario della fascia costiera 83
4.1. Analisi preliminare delle sezioni batimetriche 83
4.2. Confronto volumetrico su sezioni 89
4.2.1. Metodologia 89
4.2.2. Risultati del confronto 90
4.3. Computi volumetrici da confronto tra DTM 92
4.3.1. Metodologia 92
4.3.2. Risultati 93
5. Conclusioni 101
5.1. Considerazioni conclusive sull'evoluzione del litorale e sul bilancio sedimentario 101
5.2. Implementazione futura dei dati 102
Bibliografia 104

Premessa

La presente relazione ha lo scopo di illustrare l'attività svolta e i risultati ottenuti nell'ambito dell'*Accordo attuativo di collaborazione* stipulato in data 02/12/2016 tra la *Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia - Direzione Centrale ambiente ed energia* e *l'Università degli Studi di Trieste - Dipartimento di Matematica e Geoscienze* per lo *studio delle evoluzioni della zona costiera adiacente al Comune di Grado con particolare riferimento alla zona delle spiagge e all'antistante Banco della Mula di Muggia*.

La relazione si articola in un iniziale inquadramento del litorale oggetto di studio, compreso tra la bocca di porto di Grado e la foce dell'Isonzo (Capitolo 1).

Nel Capitolo 2 vengono elencati e brevemente descritti i principali strumenti conoscitivi disponibili per l'area (cartografia, foto aeree, rilievi topo-batimetrici).

Nel Capitolo 3 viene affrontata nel dettaglio l'analisi evolutiva dei litorali compiuta attraverso gli strumenti conoscitivi a disposizione, soprattutto grazie all'analisi cartografica e delle foto aeree, ma anche con l'ausilio dei dati batimetrici su profilo. Vengono messe in evidenza le modifiche intervenute nel comparto costiero sia dal punto di vista antropico (modificazioni territoriali più importanti, costruzione di opere di difesa o di regimazione idraulica, escavo di canali), che geomorfologico (avanzamento, arretramento della linea di riva, modificazioni dei fondali, migrazione di corpi sedimentari). Particolare attenzione è stata posta all'analisi critica e alla revisione dei dati e di quanto affermato in studi precedenti. Per alcune annate, scelte sulla base della possibilità di utilizzare un buon dataset, viene presentata una carta geomorfologica frutto dell'interpretazione congiunta dei dati disponibili. A conclusione del Capitolo 3 viene proposta una sintesi delle fasi evolutive attraversate dai litorali in oggetto.

Nel Capitolo 4 vengono esposte le analisi eseguite sui profili topo - batimetrici a disposizione per l'area in particolare quelle relative agli anni 1968, 1978, 1985 e 2007. Viene presentata una revisione critica dei dati, l'individuazione di indicatori geomorfologici, le metodologie utilizzate per il confronto quantitativo su profili e per ottenere un modello tridimensionale dei fondali (*Digital Terrain Model - DTM*). Gli stessi dati sono stati infatti messi a confronto attraverso diverse metodologie (confronto su sezioni, differenze tra DTM) per ottenere un quadro il più preciso possibile preciso delle modificazioni avvenute ai fini della quantificazione del bilancio sedimentario costiero. Da ultimo i risultati relativi al bilancio sedimentario sono stati commentati e discussi anche in relazione a un contesto più ampio e agli studi eseguiti in passato.

Infine il Capitolo 5 riporta una serie di considerazioni conclusive alla luce delle analisi effettuate e fornisce alcune indicazioni per la futura implementazione dei dati, il cui scopo sarà quello di ottenere un corretto aggiornamento dello stato del litorale e consentire un'adeguata programmazione di eventuali interventi di sistemazione costiera sull'area.

Desideriamo ringraziare per la collaborazione e l'aiuto offerto:

- Il Prof. Antonio Brambati
- Il Sig. Stefano Caressa
- Il Dott. Giacomo Casagrande (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia)
- Il Prof. Andrea Favre tto
- Il Dott. Marco Lipizer (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia)
- Il Prof. Ruggero Marocco

1. Inquadramento

1.1. Caratteristiche del sistema costiero

Il litorale oggetto di questo studio, interamente incluso nel Comune di Grado, è compreso tra la bocca di porto di Grado a ovest e la foce del fiume Isonzo a est Figura 1.1. Esso fa parte del più vasto sistema di spiagge basse sabbiose del Friuli Venezia Giulia limitato a ovest dalla foce del Tagliamento e a est da quella del Timavo, dove ha inizio la costa alta rocciosa.

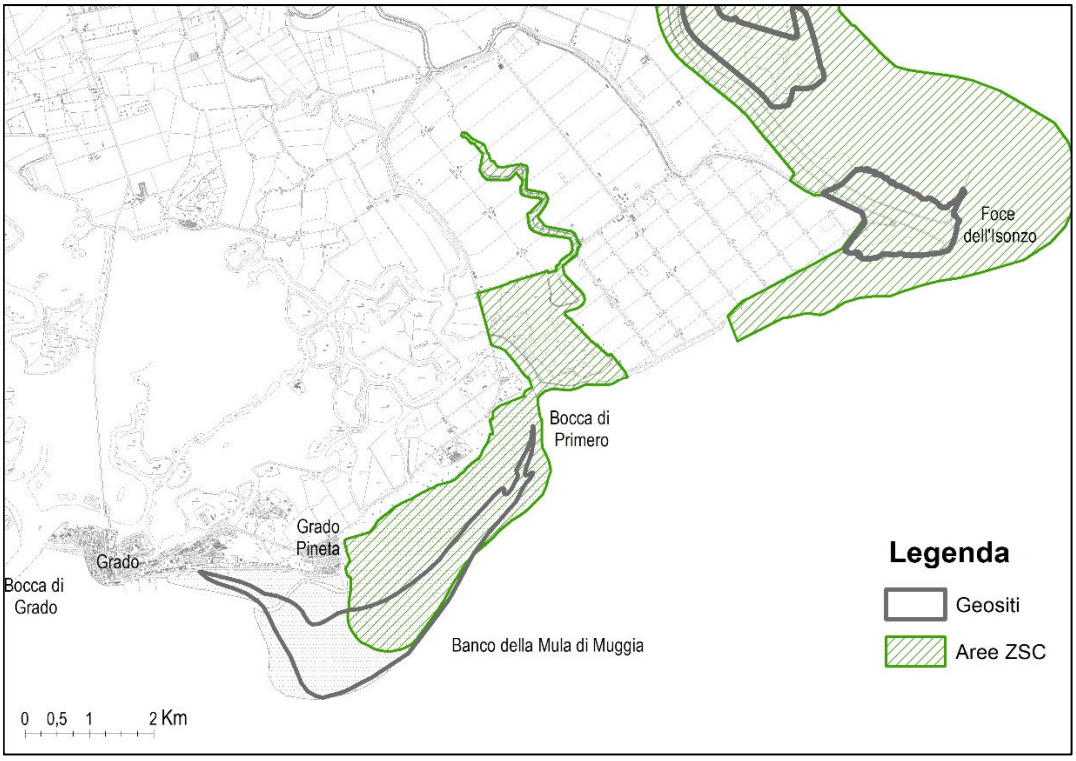


Figura 1.1 - Inquadramento dell'area di studio con indicati i perimetri dei Geositi e delle aree denominate come Zone di Conservazione Speciale secondo la Direttiva habitat. Base cartografica: Carta Regionale Numerica – Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (anno 2002).

Si tratta di un litorale che è andato soggetto in tempi storici a significative modificazioni legate ai processi naturali ma anche e soprattutto all'azione dell'uomo con le opere di bonifica agraria e lo sviluppo turistico.

Dal punto di vista geomorfologico questo tratto costiero può essere definito come un sistema di isole barriera (*barrier islands*) e frecce litorali (*spit*) che nell'insieme rappresentano la naturale separazione tra la Laguna di Marano e Grado e il mare. Essi hanno tratto origine e si sono evoluti in stretta relazione agli apporti sedimentari di Isonzo e Tagliamento.

A livello regionale il prisma sedimentario costiero è costituito da un corpo a forma approssimativa di cuneo che si raccorda ai fondali verso i 13-15 m di profondità e che è il risultato dei processi erosivi e deposizionali che hanno interessato i depositi costieri negli ultimi 5000 anni circa (tardo Olocene), quando il livello del mare ebbe una fase di stazionamento denominata *stazionamento alto* ((la cui marcatura sismostratigrafica è data dall'*High-stand Systems Tract – HST*: cfr. Trincardi et al. 2011, *Carta geologica dei mari italiani - Foglio Venezia*).

I fondali del Golfo di Trieste in particolare possono essere distinti in due parti (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 1985; Marocco, 1989; Gordini et al., 2003):

- Una zona fino ai 4-5 m (spiaggia sottomarina superiore o *upper shoreface*) contraddistinta da sabbie e da morfologie influenzate dalle onde e dalle correnti; la parte più dinamica di questo sistema è quella più prossima alla costa, dove di norma si sviluppano dei sistemi allungati di barre e truogoli fino a una profondità fino a profondità di circa 2.50-3 m caratterizzata da sistemi allungati di barre e truogoli. È qui che avviene il massimo del trasporto lungo riva (*longshore transport*), fenomeno responsabile del trasporto della sabbia dalle fonti sedimentarie (fiumi) lungo le spiagge adiacenti.
- Una zona più profonda fino ai 13-15 m definita da fondali lisci a pendenza costante e caratterizzata da sedimenti fini (fanghi o peliti). I sedimenti di questa zona vengono movimentati solo in occasioni di mareggiate di notevole entità e il limite inferiore è costituito in genere da sedimenti soffici legati alla deposizione di materiale fine portato dai fiumi. Nell'area in esame a queste profondità si ha però anche la presenza di corpi sedimentari relitti.

A profondità maggiori si trovano strutture sedimentarie residuali) legate alla storia geologica del bacino (Trincardi et al., 2011; Trobec et al., 2017).

A livello di Nord Adriatico l'isobata dei -5 m si colloca parallelamente alla linea di riva ma subisce una estroflessione in corrispondenza della presenza delle bocche tidali e delle foci fluviali che tendono a generare corpi sedimentari di forma lobata: i delta di riflusso (*ebb delta*) e i delta fluviali (Figura 1.2).

In questo contesto il litorale oggetto di questo studio è caratterizzato dalla presenza di strutture sedimentarie di significativo spessore come il banco della Mula di Muggia e il delta dell'Isonzo, che assieme a quelle del delta del Tagliamento e della bocca di Lignano rappresentano sistemi di accumulo sedimentario legati ai sistemi fluviali attuali e olocenici (Figura 1.3; Marocco, 2009; Trobec et al., 2017).

Il corpo sedimentario noto come Banco della Mula di Muggia è un alto morfologico che si estende sui fondali compresi tra Grado e la bocca di Primero, al quale viene attribuita un'origine deltizia (Brambati, 1983; Marocco, 1989). In pianta assume forma approssimativamente triangolare con apice rivolto a sud, occupa una superficie di circa 15.7 km^2 e presenta una vasta parte semisommersa costituita da un vasto insieme di barre e truogoli, esso delimita verso terra un'area di retrobanco con fondali colonizzati da fanerogame marine. Verso mare le barre si fanno via via più profonde e si raccordano ai fondali antistanti con una ripida scarpata. Sui 10 m di profondità è poi presente un altro corpo sabbioso allungato di origine non nota (Marocco & Figus, 2009).

Il delta dell'Isonzo è costituito da un apparato deltizio impostatosi in corrispondenza della foce di Sdobba divenuta l'unico canale distributore del fiume dopo l'occlusione del ramo della Quarantia nel 1937. Presenta una forma digitata, con un'ampiezza alla base di circa 1300 m e alla foce di circa 700 m, a mare si estende per circa un chilometro e mezzo con direzione NNO - SSE. La piana deltizia è costituita da paludi erbacee e fragmiteti che lasciano il posto verso mare a piane di marea a sedimentazione sabbiosa-pelitica che si estendono per circa 700 m dalla linea di riva (Banco Spigolo e Banco del Becco). Una serie di barre caratterizzano il fronte deltizio.

Attualmente buona parte del Banco della Mula di Muggia è compresa nella Rete Natura 2000 in particolare nella *Zona di Conservazione Speciale ZSC e di protezione Speciale ZPS - IT 3330006 Val Cavanata e Banco Mula di Muggia* ed è anche stata individuata come *Geosito* dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (Figura 1.1).

La presenza del Banco della Mula di Muggia e dei bassi fondali adiacenti alla foce dell'Isonzo fa sì che la spiaggia retrostante sia una spiaggia protetta a bassa energia e come tale sia caratterizzata da un aspetto anomalo rispetto alle altre spiagge adriatiche (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 1985). La condizione di ambienti protetti determina alcune problematiche per queste spiagge che, in maniera poco previdente, sono state in gran parte adibite a un utilizzo turistico balneare. Fanno eccezione il tratto di

spiaggia a ovest dell'abitato di Grado (detta Costa Azzurra) e la porzione più occidentale della spiaggia dell'Azienda Autonoma di Grado, che sono invece spiagge più attive in senso morfodinamico e quindi con caratteristiche più simili a quelle delle altre spiagge del Nord Adriatico.

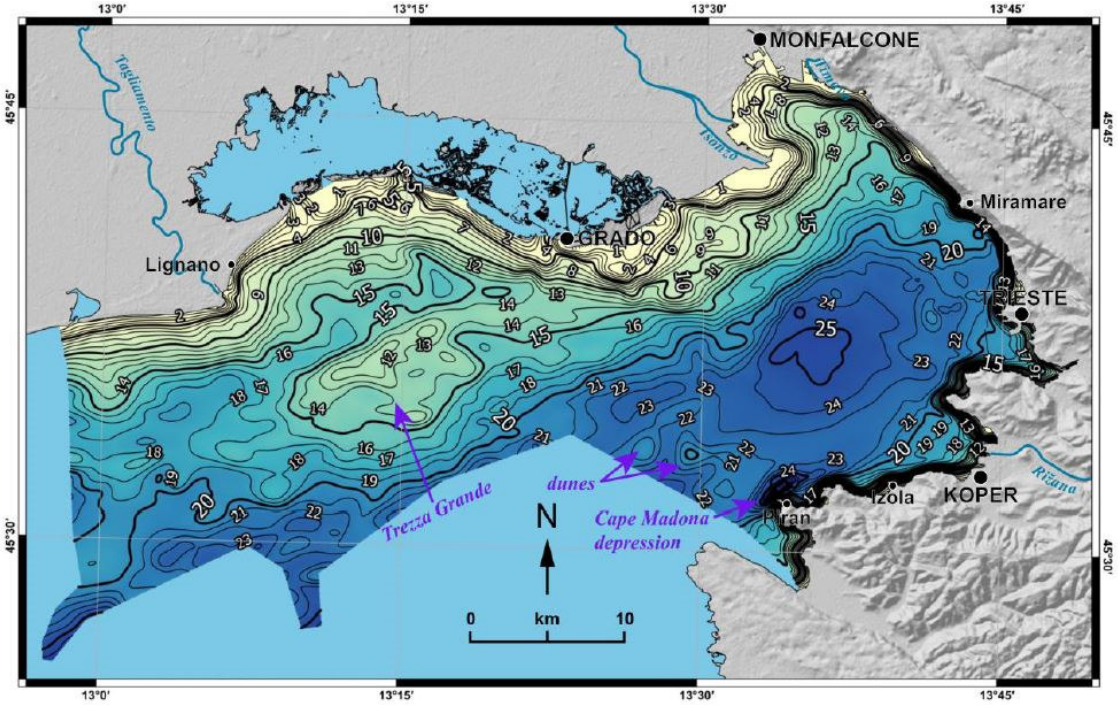


Figura 1.2 - Batimetria del Golfo di Trieste (da Trobec et al., 2017).

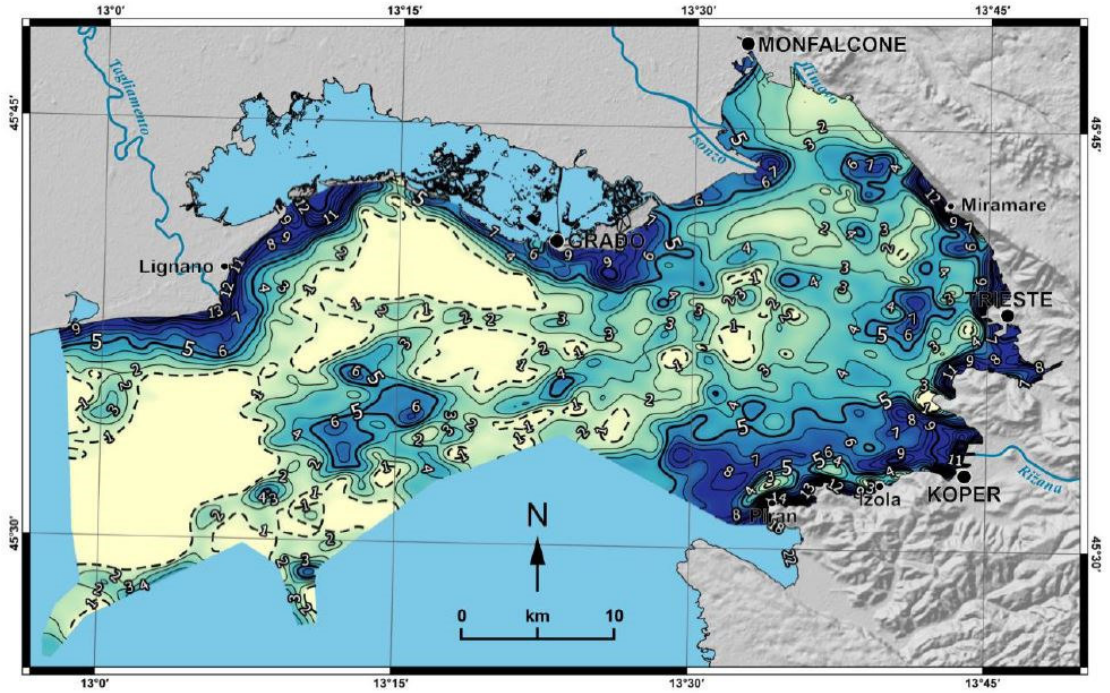


Figura 1.3 - Spessore dei sedimenti olocenici (in metri) nel Golfo di Trieste (da Trobec et al., 2017).

1.2. **Condizioni meteo –marine**

1.2.1. Fetch geografici ed efficaci

I fetch geografici (ossia le cosiddette "lunghezze di mare libero"), determinati in funzione dell'esposizione del paraggio, sono graficamente rappresentati in Figura 1.4.

Per quanto concerne invece la determinazione dei fetch efficaci, è stata utilizzata la procedura descritta nello "Shore Protection Manual" (CERC, 1984). La metodologia proposta consiste nel costruire, a partire dal punto di interesse, nove raggi con spaziatura 3° estesi fino ad incontrare la linea di riva. Il fetch efficace, per ciascuna direzione, risulta dalla media aritmetica delle 9 lunghezze dei raggi così tracciati. I fetch geografici sono limitati a 600 km.

I risultati ottenuti da tale calcolo sono rappresentati graficamente nella Figura 1.5. Si può notare che i massimi fetch efficaci corrispondono alle mareggiate di Libeccio (200°N), per le quali il fetch efficace è dell'ordine dei 180 km (circa 100 NM).

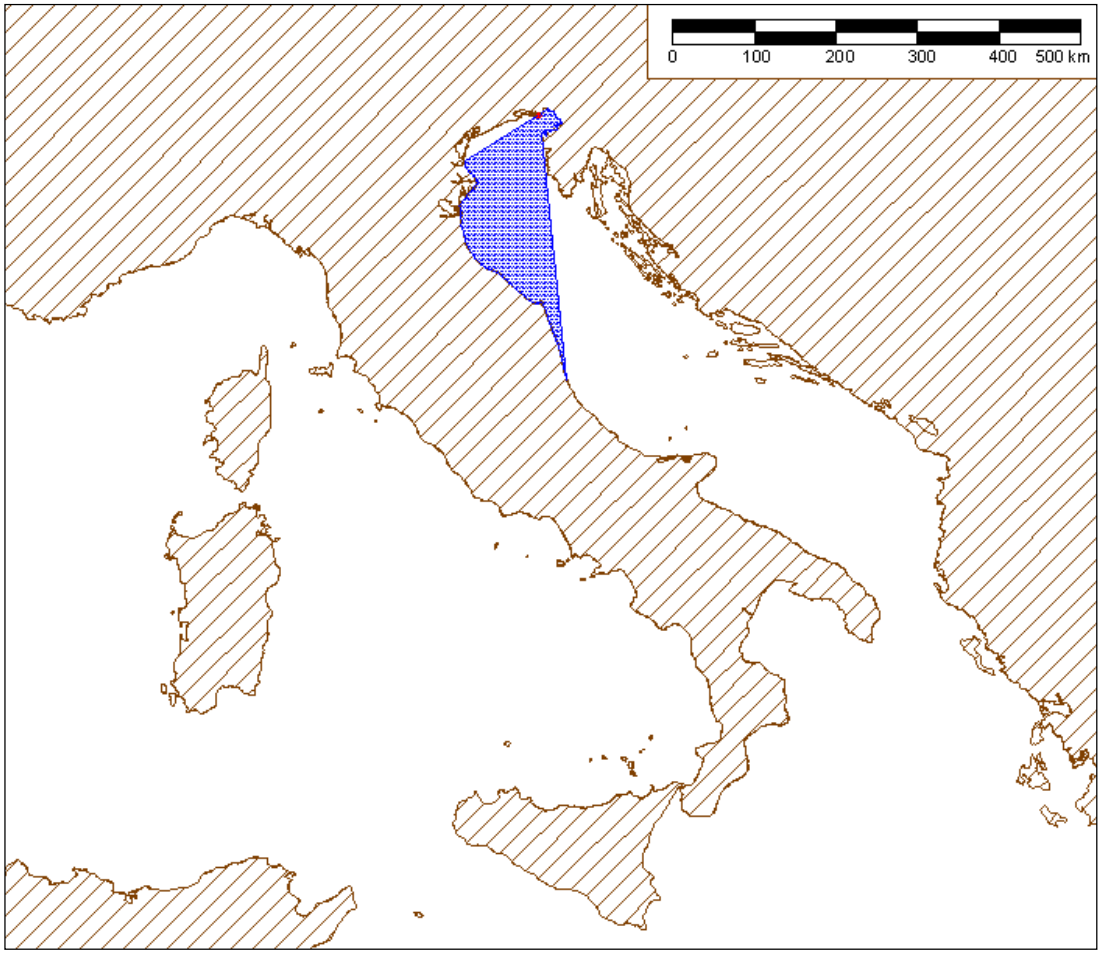


Figura 1.4 - Fetch geografici per il paraggio di Grado.

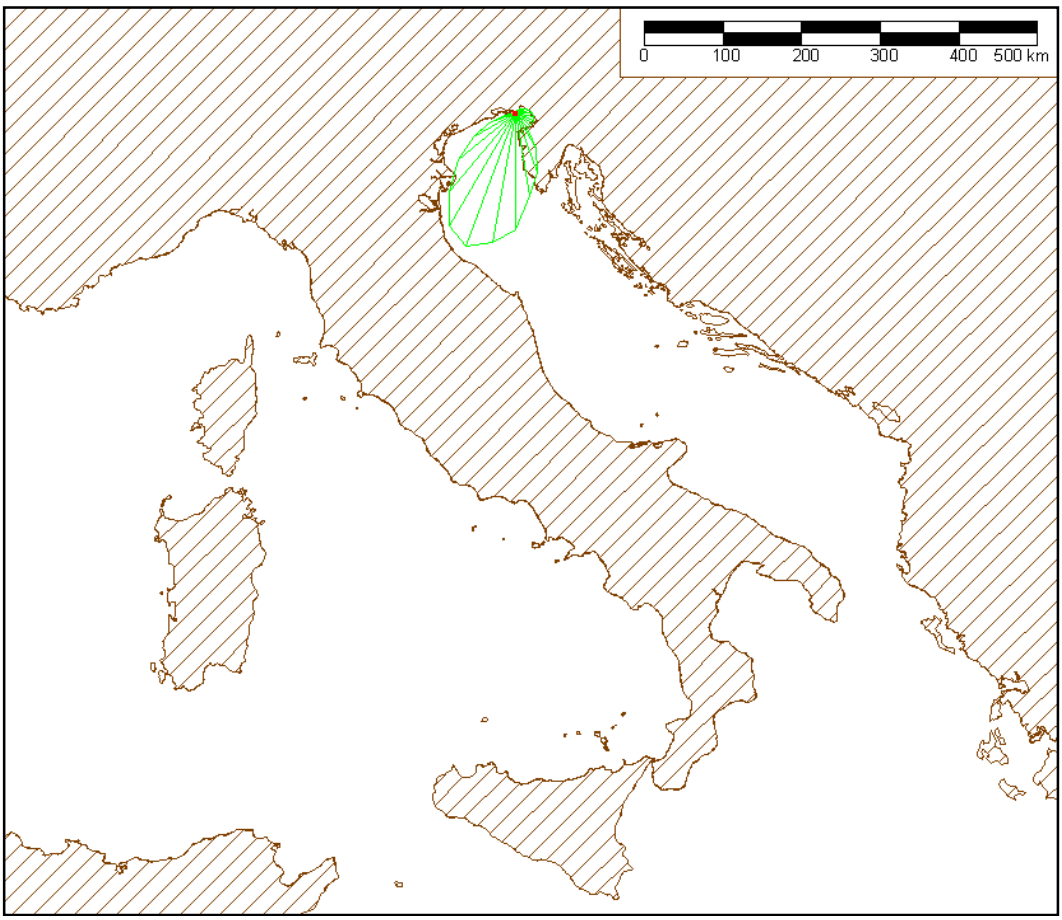


Figura 1.5 - Fetch efficaci per il paraggio di Grado.

1.2.2. Regime anemologico

La ricostruzione del regime anemologico locale è stata condotta sulla base dei dati disponibili. In particolare sono stati utilizzati i dati di vento registrati dalla stazione ISPRA di Grado (http://www.ispravenezia.it). I dati ISPRA sono stati misurati a terra (all'interno della laguna di Marano-Grado).

Il manufatto che ospita gli strumenti di misurazione è ubicato in corrispondenza del molo della darsena affacciata sul canale di Grado (a Est di Riva Brioni), all'interno della laguna di Marano – Grado (Figura 1.6).

Sono state analizzate le registrazioni dal 2000 al 2009 (escluso il 2002, perché non disponibile). I dati, alla scansione di ogni 15 minuti, sono stati trasformati in serie trioraria e accorpati in classi sia di direzione che di intensità. In

Tabella 1.1 e Tabella 1.2 sono riassunti i risultati ottenuti.

Si osserva che i venti di maggiore frequenza hanno velocità comprese tra 2 e 4 m/s (regime di brezza), mentre i venti di una certa intensità, superiore a 8 m/s, sono pari a circa il 4.5% del totale (Tabella 1.1).

L'analisi della direzione di provenienza (Tabella 1.2) conferma che per la zona di Grado i venti più frequenti sono gli stessi che sono maggiormente persistenti sull'Adriatico settentrionale, ossia quelli provenienti dal I quadrante (Bora). Meno frequenti sono i venti provenienti dal settore orientale (Levante),

meridionale (Scirocco) e Sud Occidentale (Libeccio) mentre molto più rari sono i venti provenienti dal settore occidentale (Ponente e Maestrale).

Figura 1.6 - Stazione ISPRA di Grado (Long. 13° 23' 00,38" E; Lat. 45° 40' 59,26" N).

Tabella 1.1- Statistica della velocità del vento relativa alla stazione di Grado per il periodo 2000-2009.

Tabella 1.2 - Statistica della direzione di provenienza del vento relativa alla stazione di Grado per il periodo 2000-2009.

TABELLA 1

v(m/s)	n°valori	Frequenza%
0-1	3632	13.81
1-2	5738	21.81
2-4	9251	35.17
4-6	3362	12.78
6-8	1441	5.48
8-10	778	2.96
>10	386	1.47
N/D	1716	6.52

TABELLA 2

Direzione	n°valori	Frequenza%
N	141	0.54
NNE	1925	7.32
NE	3954	15.03
ENE	3752	14.26
E	1834	6.97
ESE	1579	6.00
SE	1395	5.30
SSE	1828	6.95
S	1840	7.00
SSO	1881	7.15
SO	1550	5.89
OSO	1173	4.46
O	628	2.39
ONO	553	2.10
NO	373	1.42
NNO	182	0.69

Le rose dei venti riportate in Figura 1.8 indicano che i venti provenienti dal I quadrante sono generalmente anche quelli più intensi. In effetti, anche nel sito di Grado gli eventi più gravosi sono quelli generati dal vento di Bora che, come è noto, nel Golfo di Trieste può soffiare a velocità anche superiori a 100 km/h. Tuttavia dal grafico dei venti dominanti si evince che la stazione di Grado registra venti intensi anche provenienti dal settore orientale (Levante) e da quello sud-orientale (Scirocco).

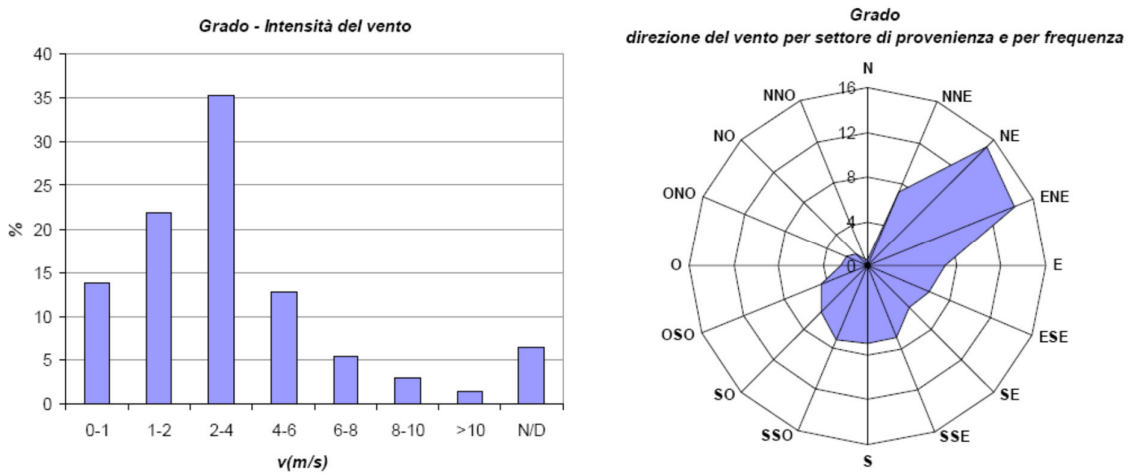


Figura 1.7 - Stazione di Grado: percentuali di accadimento di velocità e direzione del vento. Dati triorari 2000-2009.

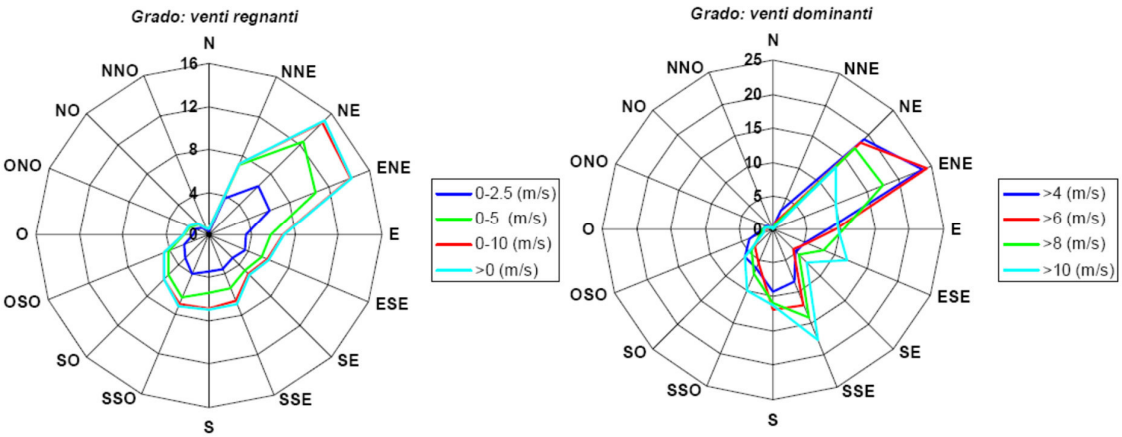


Figura 1.8 - Stazione di Grado: rose dei venti dominanti e regnanti. Dati triorari 2000-2009.

1.2.3. Marea

Le variazioni del livello del mare sono riconducibili principalmente alla sovrapposizione tra le oscillazioni della marea astronomica e la cosiddetta "componente meteorologica" (variazioni di livello in Adriatico dovute alle variazioni bariche, al vento, alle sesse).

La marea astronomica segue l'andamento semidiurno caratteristico delle aree costiere Nord Adriatiche, dominate dalle componenti luni-solari. Il mese astronomico tipico (circa 28 giorni) alterna una fase di oscillazioni pronunciate (sizigie), che superano di poco 1.0 m di ampiezza, con una fase di oscillazioni modeste (quadrature), in cui le escursioni del livello sono pari ad alcune decine di centimetri (Figura 1.9).

L'andamento della marea astronomica rispetto al livello medio del mare può essere calcolato con anticipo, utilizzando una serie di costanti armoniche che sono valutate elaborando i dati registrati nella stazione di riferimento per un congruo numero di anni.

Nel caso in esame la previsione della marea astronomica è disponibile per la stazione di Grado, che fa parte della Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord - Adriatico (RMLV), gestita da ISPRA, Venezia. Per omogeneità con le altre stazioni della rete, anche le previsioni della marea

astronomica della stazione di Grado sono riferite alla quota convenzionale di riferimento per la laguna di Venezia, che è posta sullo zero mareografico di Punta della Salute (ZMPS). Questo riferimento, calcolato su un arco di anni attorno allo stesso 1897, è mantenuto come riferimento fisso rispetto a Venezia anche a fronte di fenomeni di subsidenza. Per riportare i dati del mareografo di Grado al livello convenzionale di riferimento per il medio mare utilizzato nella cartografia (zero IGM Genova 1942) è necessario sottrarre ad essi 23.5 cm.

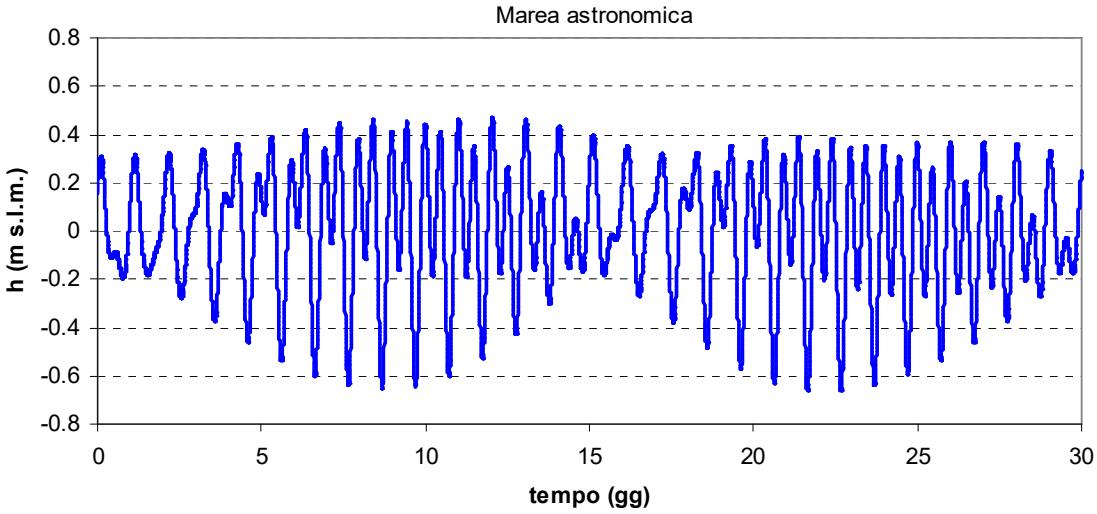


Figura 1.9 - Andamento delle oscillazioni della marea presso le bocche di Grado e Primero durante un mese astronomico tipico (fonte: CNR-ISMAR. Rif. Livello medio del mare).

Per valutare il massimo innalzamento del livello del mare dovuto alla componente astronomica, sono state prese in considerazione le maree astronomiche previste per la stazione di Grado per l'anno 2009, fornite da ISPRA, Venezia. In tale anno, il massimo valore previsto è di 83 cm ZMPS, cioè di circa 60 cm rispetto al livello medio del mare.

Il sovralzo meteorologico si verifica durante le perturbazioni che investono l'Adriatico settentrionale soprattutto durante la stagione autunnale e invernale. Per effetto dello stato depressionario associato alle perturbazioni e dei venti sud-orientali (Scirocco), il livello della superficie liquida dell'Alto Adriatico si può facilmente innalzare di parecchie decine di centimetri (Figura 1.10). Le situazioni più gravose per il litorale logicamente si verificano se il sovralzo meteorologico si sviluppa in concomitanza con le maree sizigiali. Inoltre ad esso possono sommarsi gli effetti di oscillazioni periodiche del livello nell'Adriatico (le sesse), a loro volta innescate dagli stati depressionari e dal vento di Scirocco. In definitiva, il sovralzo meteorologico può spesso superare i 50 cm e, nei casi peggiori, arrivare a superare il metro.

In alcune aree costiere dell'Alto Adriatico sono possibili sovralzi significativi anche in concomitanza con situazioni di venti provenienti dal quadrante Nord Orientale (Bora). Un'analisi dell'andamento dei livelli registrati dalla stazione di Grado ha messo tuttavia in evidenza che per tale stazione questa circostanza non si verifica, e quindi, per una stima dei sovralzi possibili in occasione delle perturbazioni e delle mareggiate di Bora, è possibile riferirsi alla sola componente astronomica della marea.

Nell'area oggetto di studio i livelli di marea sono registrati con continuità presso le stazioni mareografiche di Grado e Primero (Figura 1.11). Per la presente analisi sono state acquisite le serie mareografiche complete per il decennio 2000-2011, fornite da ISPRA, Venezia.

Sulla base dei dati suddetti sono state estratte le serie temporali dei cosiddetti "estremali" (massimi e minimi di marea). Scelte come soglie rispettivamente le quote di 80, 100, 120 cm per i massimi e 0, -20 e -40 per i minimi sono state determinate le frequenze di superamento dei livelli registrati dai due mareografi per tutto il periodo oggetto di analisi (2000-2011). I dati di marea sono riferiti, come si è detto,

allo zero mareografico di Punta della Salute (rif. ZMPS) e per questo più alti di 23.5 cm rispetto ai medesimi calcolati su IGM42.

Figura 1.10 - Situazione atmosferica che innesca il sovralzo meteorologico nell'Alto Adriatico (fonte: ISPRA, Dipartimento Tutela Acque Interne e Marine).

Figura 1.11 - Posizione dei mareografi di Grado e Primero

Il grafico di Figura 1.12 rappresenta la frequenza dei colmi e dei cavi di marea superiori a determinate soglie ottenuta dall'elaborazione. Dal grafico si evince che il comportamento delle due stazioni, con riferimento alle situazioni "estreme" di marea è sostanzialmente analogo, dato che le differenze che si osservano sono molto contenute. Parte delle differenze, può tuttavia imputarsi alla mancanza di dati per lunghi periodi nella serie di Primero.

Ciò premesso, con riferimento ai colmi di marea, dal grafico di Figura 1.12 si evince che la frequenza dei casi superiori alla soglia di 80 cm ZMPS che, come si è detto in precedenza, è all'incirca la quota massima che può raggiungere la sola componente astronomica della marea, è dell'ordine del 15-20%.

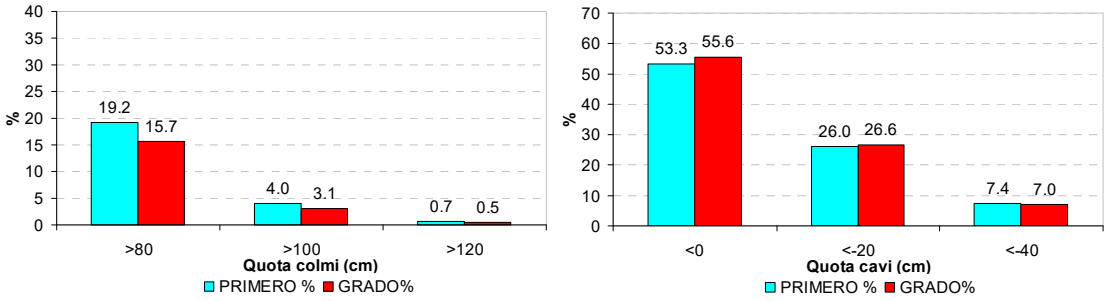


Figura 1.12 - Livelli misurati dai mareografi di Grado e Primero: frequenza dei colmi e dei cavi di marea per classi di altezza (rif. ZMPS).

Con riferimento all'aspetto di maggiore interesse per il presente studio, che è rappresentato dai massimi sovralzi possibili del livello del mare, si è provveduto anche a selezionare tutti gli episodi in cui, per almeno una delle due stazioni, il livello di marea ha superato la soglia di 120 cm ZMPS. Nella

Tabella 1.3, tali episodi sono elencati in ordine decrescente, con riferimento alla stazione di Primero, che è quella più baricentrica.

Si osserva che il caso più gravoso (171 cm ZMPS) si è presentato il primo dicembre 2008 e in tale caso entrambe le stazioni mareografiche forniscono lo stesso dato. Si osserva peraltro che sussiste, in generale, un'ottima corrispondenza tra le segnalazioni fornite dai due strumenti, il che conferma ulteriormente che, anche con riferimento alle situazioni di maree estreme, il sovralzo degli specchi d'acqua nell'intorno delle due stazioni è molto simile.

Tabella 1.3 - Confronto eventi massimi a Grado e Primero (2000-2011)(rif. ZMPS).

GRADO		**PRIMERO**		**GRADO**		**PRIMERO**	
DATA	*QUOTA*	*DATA*	*QUOTA*	*DATA*	*QUOTA*	*DATA*	*QUOTA*
1/12/08 10.50	*171*	*1/12/08 10.00*	*171*	*25/1/09 22.10*	*99*	*24/1/09 22.00*	*127*
24/12/10 0.30	*154*	*24/12/10 0.40*	*153*	*30/3/10 21.20*	*128*	*30/3/10 21.40*	*126*
31/10/04 11.20	*141*	*31/10/04 11.30*	*153*	*8/1/01 8.10*	*123*	*8/1/01 9.00*	*126*
28/2/10 22.10	*128*	*28/2/10 22.20*	*150*	*26/2/10 21.20*	*107*	*26/2/10 21.00*	*126*
3/2/09 1.30	*117*	*3/2/09 1.50*	*149*	*28/2/10 9.50*	*106*	*28/2/10 9.50*	*126*
19/2/10 23.00	*129*	*19/2/10 23.20*	*148*	*24/1/09 21.40*	*96*	*25/1/09 22.20*	*126*
3/12/05 11.00	*137*	*3/12/05 11.30*	*143*	*23/12/10 10.30*	*129*	*23/12/10 10.30*	*125*
16/11/02 8.10	*138*	*16/11/02 7.50*	*140*	*19/11/02 9.10*	*120*	*19/11/02 9.00*	*124*
3/12/10 7.30	*142*	*3/12/10 7.10*	*139*	*27/4/09 22.50*	*112*	*27/4/09 23.00*	*124*
16/11/02 18.40	*138*	*16/11/02 18.00*	*139*	*26/11/10 11.50*	*126*	*26/11/10 12.00*	*123*
26/1/09 22.50	*109*	*26/1/09 22.50*	*139*	*19/11/10 7.40*	*125*	*19/11/10 7.30*	*123*
27/12/04 9.30	*130*	*27/12/04 9.50*	*138*	*9/12/06 11.30*	*117*	*9/12/06 12.10*	*123*
19/2/10 14.30	*118*	*19/2/10 14.10*	*138*	*1/11/04 10.10*	*116*	*1/11/04 10.30*	*123*
21/11/00 6.40	*138*	*21/11/00 6.40*	*136*	*28/1/09 10.20*	*94*	*28/1/09 10.50*	*123*
6/11/00 20.20	*137*	*6/11/00 20.40*	*136*	*4/12/10 7.20*	*126*	*4/12/10 7.20*	*122*
2/2/09 0.50	*107*	*2/2/09 1.20*	*136*	*5/4/00 23.20*	*120*	*5/4/00 23.10*	*122*
10/11/04 7.20	*125*	*10/11/04 7.40*	*135*	*3/1/01 4.00*	*120*	*3/1/01 3.30*	*122*
6/6/02 20.30	*135*	*6/6/02 19.10*	*134*	*14/12/08 10.00*	*120*	*14/12/08 10.20*	*122*
26/2/10 8.10	*116*	*26/2/10 7.50*	*133*	*27/10/04 9.10*	*116*	*27/10/04 9.30*	*121*
18/11/02 9.10	*128*	*18/11/02 9.20*	*132*	*25/2/10 7.20*	*103*	*25/2/10 7.20*	*121*
1/3/10 22.30	*113*	*1/3/10 22.10*	*131*	*27/2/10 21.50*	*101*	*27/2/10 21.40*	*121*
16/10/04 9.50	*123*	*16/10/04 10.10*	*130*	*25/12/10 0.50*	*123*	*25/12/10 0.30*	*120*
24/10/06 10.10	*123*	*24/10/06 10.00*	*130*	*27/12/00 22.50*	*121*	*27/12/00 22.50*	*120*
27/1/09 23.20	*101*	*27/1/09 23.30*	*130*	*14/11/01 9.10*	*121*	*14/11/01 9.10*	*119*
21/11/10 23.00	*128*	*21/11/10 23.00*	*129*	*10/12/08 20.10*	*121*	*10/12/08 20.30*	*119*
26/12/04 9.20	*124*	*26/12/04 9.30*	*129*	*8/2/09 8.40*	*129*	*8/2/09 8.00*	*118*
28/5/07 17.30	*120*	*28/5/07 17.20*	*129*	*2/12/10 7.30*	*121*	*2/12/10 7.20*	*117*
27/1/09 9.40	*97*	*27/1/09 10.00*	*128*	*29/3/09 21.00*	*121*	*29/3/09 20.30*	*106*
22/10/02 9.40	*-*	*22/10/02 9.40*	*128*				

1.2.4. Moto ondoso

Il clima di moto ondoso deriva dai risultati di un programma di ricerca recentemente portato a termine dal *Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA)* dell'Università di Genova: i dati sono ottenuti per mezzo di un procedimento di "*wave hindcasting*" (ricostruzione dello stato del mare sulla base di dati meteorologici, mediante l'utilizzo di modelli numerici) ad alta risoluzione. L'elaborazione dei dati, ottenuti da una reanalisi delle condizioni meteomarine estesa da gennaio 1979 a giugno 2014, è stata curata da HS Marine srl di Noventa Padovana (PD).

- *Caratteristiche del moto ondoso al largo*

Il MetOcean group, operante all'interno del DICCA dell'Università di Genova ha sviluppato una reanalisi delle condizioni atmosferiche e di moto ondoso che va dal gennaio 1979 fino alla fine di giugno 2014. La reanalisi dei dati meteorologici è stata sviluppata utilizzando il *Climate Forecast System Reanalysis* del NCEP, CFSR per il periodo dal gennaio 1979 al dicembre 2010 e il CFSv2 per il periodo dal gennaio 2011 al giugno 2014.

L'analisi hindcast è stata eseguita per tutto il bacino del Mediterraneo con una risoluzione di 0,1° forzando il modello, ampiamente validato, con i dati del CFSR, ricavati dal *National Center for Environmental Prediction* (NCEP, http://cfs.ncep.noaa.gov), disponibili con una risoluzione di 0.5°.

L'analisi è stata eseguita utilizzando il modello di generazione WAVEWATCH III™, versione 3.14, operativo al DICCA, con una risoluzione media della griglia pari a 10 km.

I dati di moto ondoso forniti dall'Università di Genova si riferiscono al punto ("UniGE") di coordinate 13.40°E, 45.55°N (al largo di Punta Salvore, Figura 1.13). Le condizioni di moto ondoso, disponibili come campi bidimensionali in serie temporali orarie, comprendono altezza significativa (H_s), periodo di picco (T_p) e direzione media di provenienza (DIR).

Attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti è stato possibile definire il clima ondoso in corrispondenza del punto "UNIGE", situato al largo del Golfo di Trieste, su un fondale di circa 20 m.

La sintesi grafica del clima al largo è rappresentata in Figura 1.14, Figura 1.15 e Figura 1.16, in cui sono riportate rispettivamente le rose delle registrazioni, delle energie e delle altezze significative massime al largo.

Si può notare che nel punto al largo gli eventi con percentuale di apparizione più elevata appartengono al settore di Greco-Levante e di Mezzogiorno-Libeccio. Anche le maggiori concentrazioni di energia si individuano nei due settori di Greco-Levante e Mezzogiorno-Libeccio.

Le mareggiate caratterizzate dai valori massimi di altezza significativa sono quelle provenienti da Bora (65°N) e Mezzogiorno (175°N), per le quali si raggiungono valori di H_s rispettivamente di poco superiori e inferiori ai 4 m.

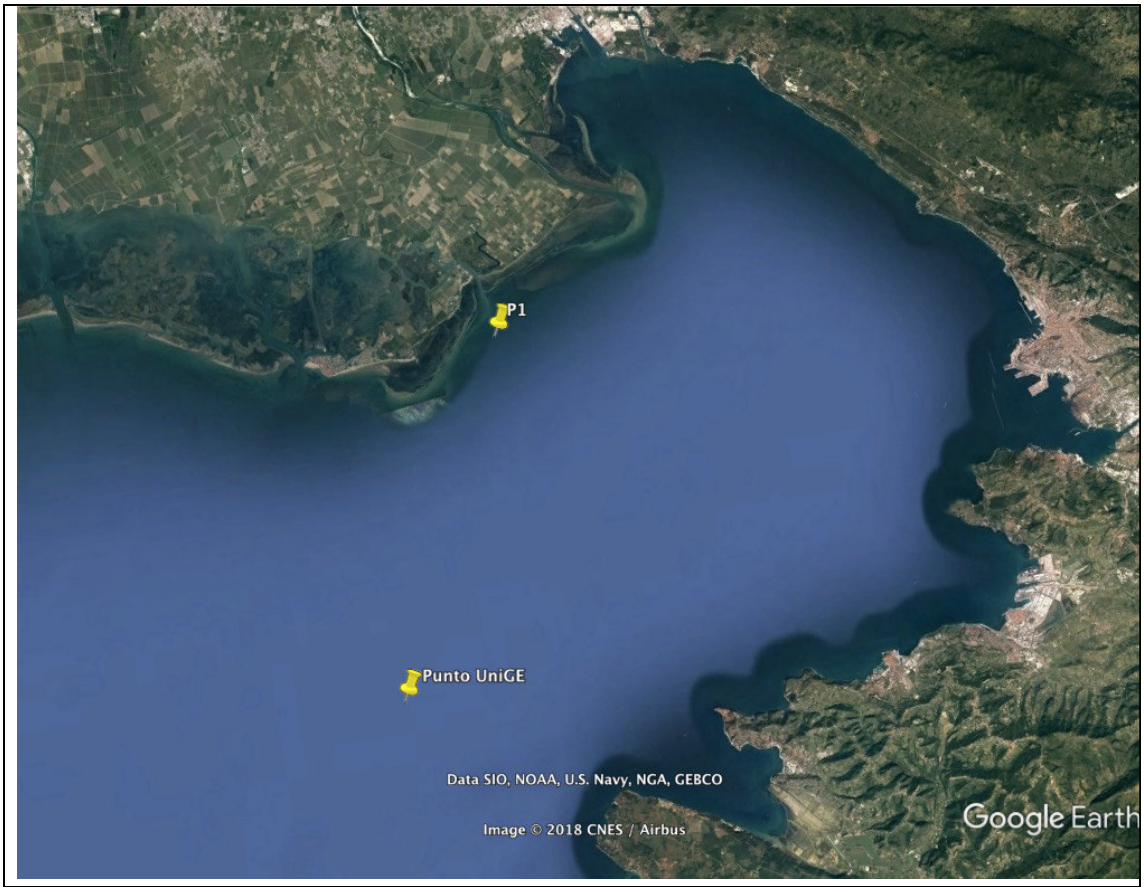


Figura 1.13 - Ubicazione del punto UNIGE e del punto P1 per la definizione del clima di moto ondoso.

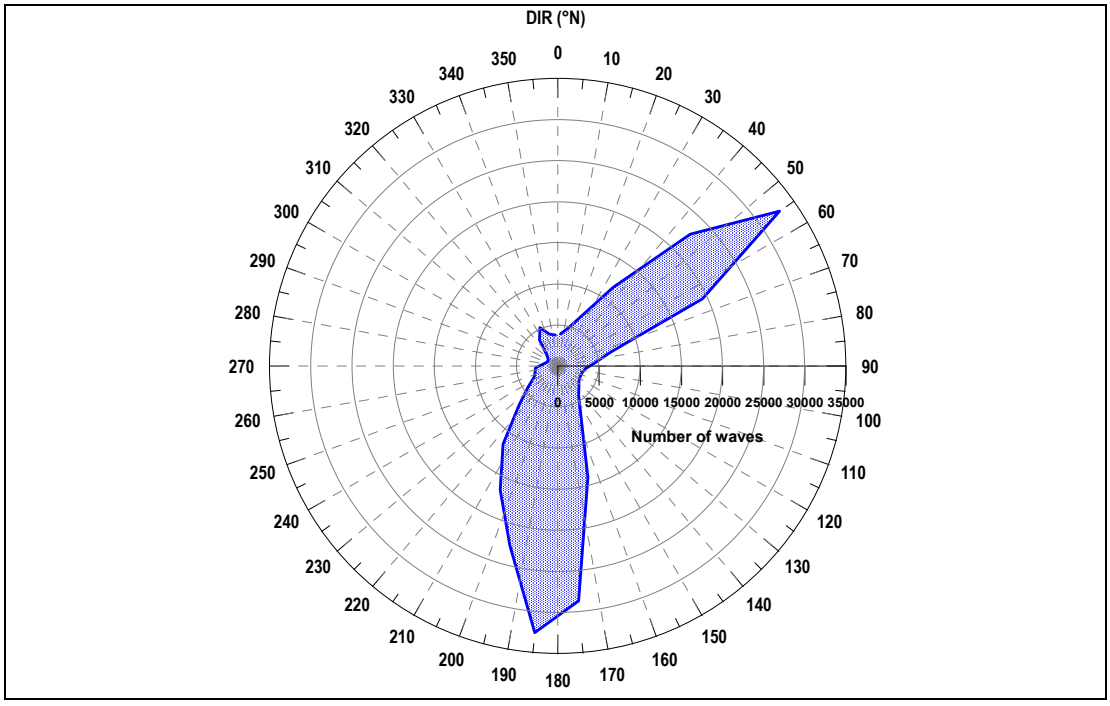


Figura 1.14 - Rosa delle registrazioni nel punto al largo

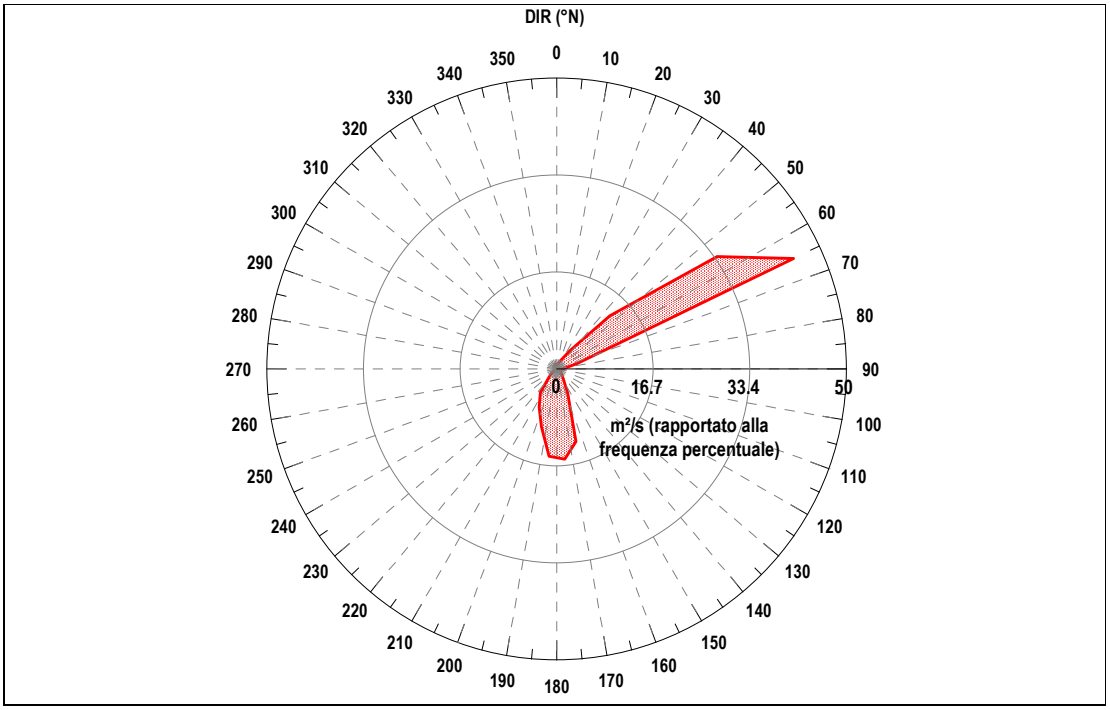


Figura 1.15 - Rosa delle energie nel punto al largo

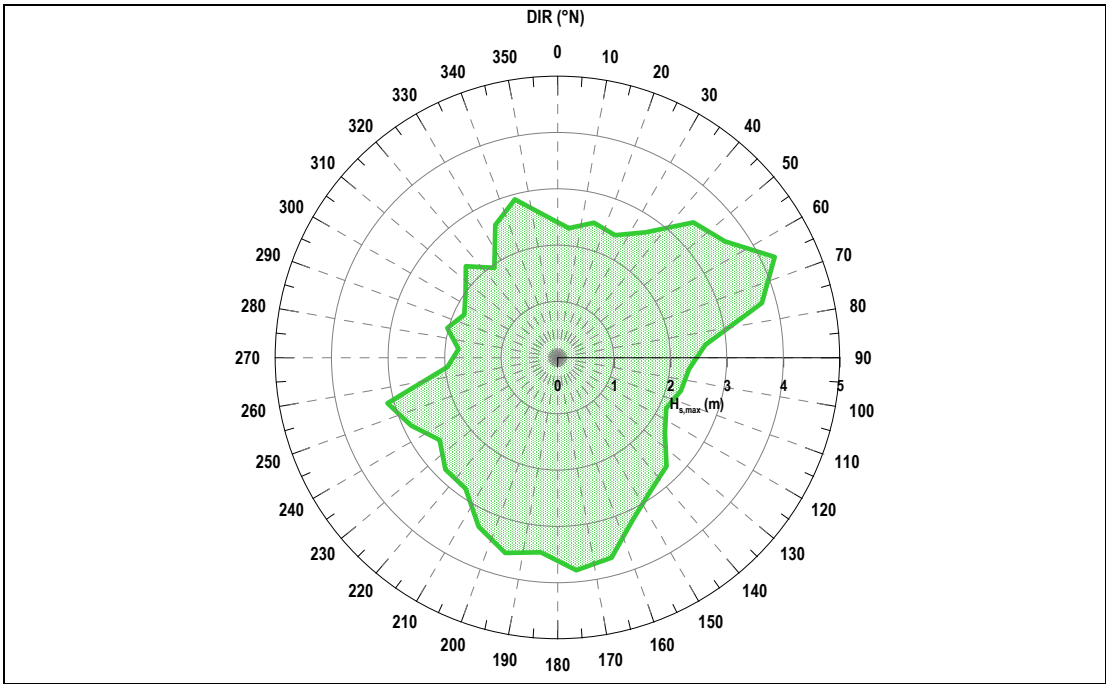


Figura 1.16 - Rosa delle altezze massime nel punto al largo

- *Caratteristiche del moto ondoso sottoriva*

Il clima ondoso al largo è stato propagato in corrispondenza di un punto baricentrico posto di fronte al canale Primero alla profondità di 4 m (punto P1 in Figura 1.13). La propagazione del clima ondoso, condotta mediante il modello numerico STWAVE (cfr. http://www.erdc.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Article/476716/steady-state-spectral-wave/), è stata basata sulla batimetria aggiornata del paraggio ricavata dalle Carte Nautiche dell'I.I.M. e dal dataset di rilievi disponibili. Nelle propagazioni sono stati considerati solamente gli eventi compresi all'interno del settore di traversia caratteristico del paraggio: 40°÷250°N.

Nelle successive figure si riportano graficamente i risultati delle elaborazioni della climatologia locale; in particolare sono state rappresentate le rose delle registrazioni e delle energie (Figura 1.17). Dall'analisi della rosa delle registrazioni e, soprattutto, di quella delle energie, si osserva che l'energia è concentrata nei settori di Bora - Levante (con picco a 85°N) e Scirocco - Mezzogiorno (con picco a 175°N), nettamente invertite rispetto al clima al largo.

In sintesi l'area sottocostiera risulta più riparata dagli eventi di Bora per l'effetto orografico causato dal protendimento della foce del fiume Isonzo. Lungo il perimetro del Banco della Mula di Muggia l'effetto di riparo si riduce, per maggiore esposizione ai mari di Bora e incremento del fetch. La forte inclinazione dei mari orientali genera di fatto una forte deriva occidentale, dovuta quasi esclusivamente ad un flusso longshore; i mari meridionali investono il paraggio in senso prevalentemente trasversale o con una componente di deriva opposta, sebbene decisamente subordinata rispetto a quella occidentale.

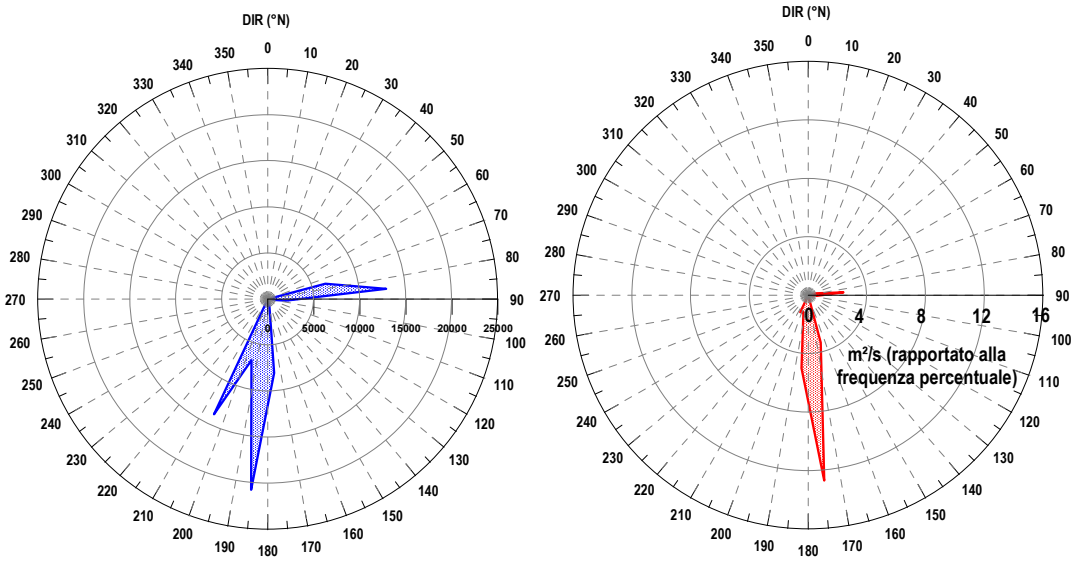


Figura 1.17 - Rosa delle registrazioni (sinistra) e delle energie (destra) – Punto P1, Primero.

1.3. **Il contesto evolutivo: innalzamento del livello del mare**

Il contesto evolutivo dei litorali in esame e del loro destino futuro sono strettamente legati al processo di innalzamento del livello marino in atto a livello globale.

L'entità di questa variazione a livello locale (innalzamento relativo del livello del mare) è il risultato della combinazione di fenomeni che agiscono in maniera diversa a livello globale, regionale e locale: la subsidenza, la tettonica, l'isostasia e l'eustatismo.

La serie storica della stazione mareografica di Trieste rappresenta molto bene l'andamento della variazione relativa del livello del mare a scala locale nell'ultimo secolo: i dati, relativi al periodo 1891-2014, mostrano un trend secolare nettamente positivo in riferimento alle variazioni annuali del livello medio marino (Figura 1.18), pari a 1.36 mm/anno. Con riferimento alla stessa serie temporale, si nota che il trend di innalzamento del livello medio del mare ha subito un forte incremento durante l'ultimo ventennio, con valori 4-5 volte superiori rispetto ai decenni precedenti (Fontolan & Pillon, 2015).

La Bassa pianura friulana è interessata dai fenomeni di subsidenza che consistono in un lento processo di abbassamento del suolo per lo più in area peri-lagunare e di pianura legato a cause sia naturali (subsidenza tettonica, termica e isostatica) che antropiche (subsidenza indotta). Le azioni antropiche infatti, quali il prelievo di acque dal sottosuolo, l'estrazione di gas, possono aumentare notevolmente i valori di abbassamento del suolo sino anche a qualche metro (Fontolan & Pillon, 2015).

L'abbassamento del suolo coinvolge nel tempo gli stessi argini difensivi collocati lungo la gronda lagunare, in particolare negli anni successivi alla loro realizzazione e a seguito dell'esecuzione delle opere di drenaggio per il recupero dei terreni a uso agricolo, che ha favorito la compattazione dei suoli. Tale abbassamento è stato ulteriormente favorito dalla presenza di livelli di torbe o di argille organiche nel sottosuolo.

Tutta la regione compresa tra la linea di livellazione che si sviluppa lungo la strada statale da Latisana a Ronchi a Nord e tra le foci del Tagliamento e dell'Isonzo a Sud, è caratterizzata da significativi fenomeni di subsidenza già accertati nel periodo 1980-89 e confermati nel periodo successivo (1989-2004).

Secondo i dati della Protezione Civile della Regione FVG (2010) il fenomeno di subsidenza interessa tutta l'area lagunare, con particolare riferimento all'arco costiero (da 4 mm/anno a Lignano a 7 mm/anno a Grado). Sulla base dei dati medi di subsidenza rilevati (5 mm/anno), nelle condizioni attuali si può prevedere che l'abbassamento del suolo fra 100 anni potrebbe essere dell'ordine di 40-50 cm.

I dati relativi al mareografo di Grado confermano l'andamento del dato di Trieste (Figura 1.19).

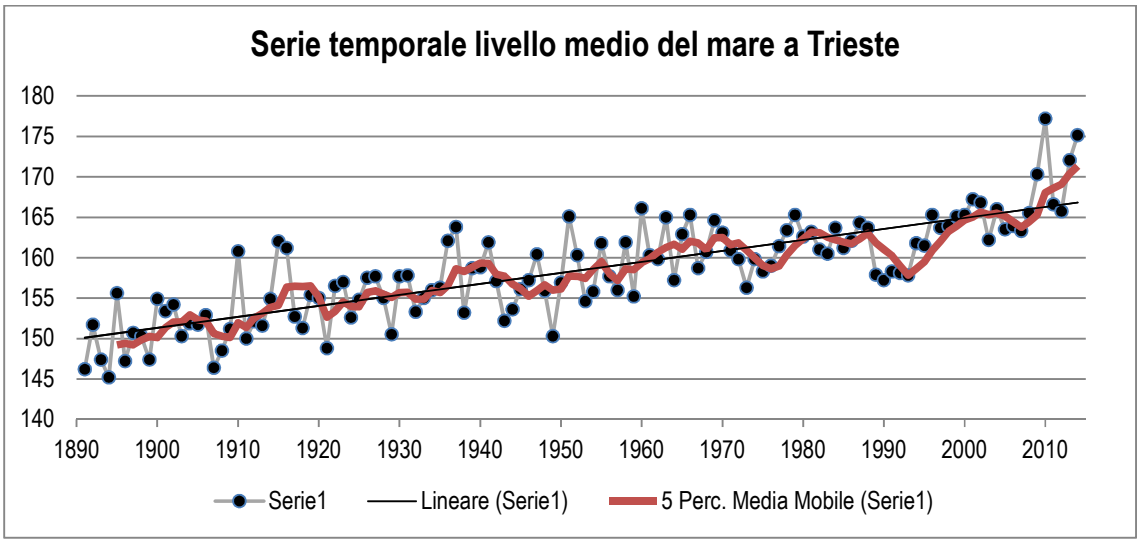


Figura 1.18 - Variazioni annuali del livello medio marino in riferimento alla Stazione Mareografica di Trieste Molo Sartorio, dati in cm riferiti allo zero locale del mareografo.

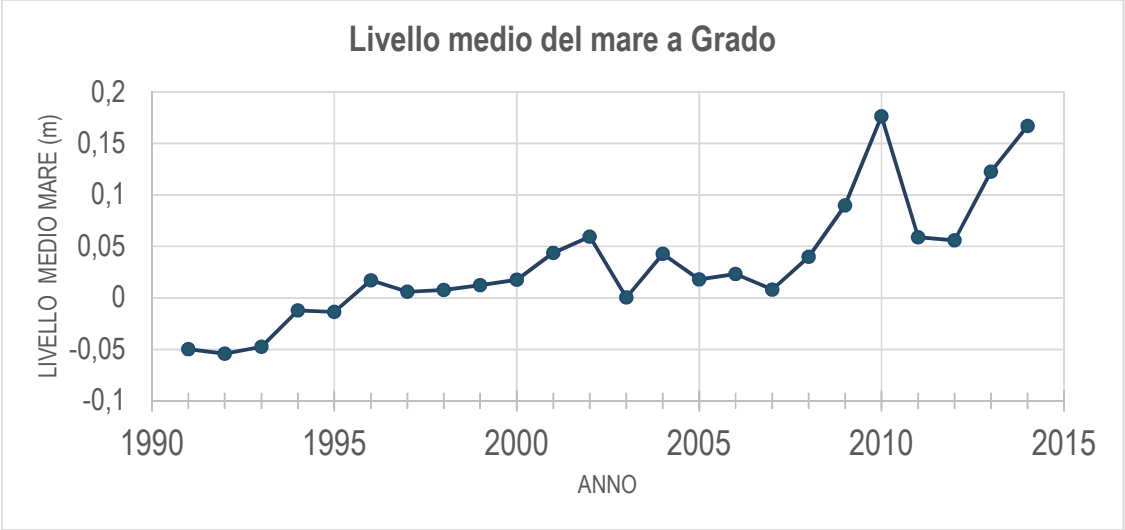


Figura 1.19 - Variazioni annuali del livello medio marino in riferimento alla Stazione di Grado, dati in m riferiti allo zero IGM 42 elaborati nell'ambito dello Studio di assetto morfologico - ambientale della laguna di Marano e Grado (Fontolan et al., 2017).

2. Strumenti conoscitivi

2.1. **Studi**

I litorali del Friuli Venezia Giulia sono stati nel passato oggetto di numerosi studi nel campo geomorfologico e sedimentologico; i due più importanti, commissionati dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, vengono brevemente descritti di seguito, accanto a uno studio realizzato dal CNR negli anni '70. Per il resto del materiale consultato si rimanda alla bibliografia presentata alla fine della presente relazione.

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 1979 - Studio dell'assetto fluviale e costiero della Regione Friuli – Venezia Giulia. Rapporto preliminare, seconda parte: parte costiera. ELC – Electroconsult, Studio Volta s.n.c., con la consulenza del prof. A. Brambati. Regione Autonoma Friuli – Venezia Giulia, Assessorato ai Lavori Pubblici, Servizio Idraulica, Trieste, 161 pp.; nella presente relazione verrà semplicemente richiamato come *Studio Volta*.

Lo *Studio Volta* presenta una trattazione sulla cartografia storica pregressa messa anche a confronto con i rilievi topo-batimetrici eseguiti ad hoc nel 1978 (basati sui rilievi CNR del 1973), e concernenti il tratto costiero tra il fiume Timavo e la foce del fiume Tagliamento.

Il lavoro è costituito da:

- Una prima parte introduttiva sulla cartografia di riferimento del lavoro e sulle operazioni di campagna per la fissazione dello stato di fatto del momento (cap. 1, 2, 3, 4);
- Una sezione in cui è inserita un'analisi dei rilievi precedenti della linea di costa e dei fondali e della cartografia antica da mettere in relazione con le sezioni acquisite (cap. 4, 5);
- Una trattazione sintetica sulla genesi ed evoluzione delle Lagune di Marano e Grado nel post-glaciale ed evoluzione della linea di riva dal 1553 al 1805 (cap. 7, 8).

A questo fa seguito una serie di capitoli dedicati a diversi tratti della costa (cap. 9-13). Il capitolo 12 nello specifico fa un'analisi sull'evoluzione, dissesti e rimedi del tratto costiero tra il canale di Grado e la foce dell'Isonzo.

Conclude poi la trattazione con:

- Considerazioni finali del regime litoraneo
- Indirizzi e comportamenti per la difesa costiera
- Piani di studio e indagini future.

Nel volume allegato, sono presenti:

- ALLEGATO A→ Carta d'insieme (A1) e Carte di dettaglio (A4, 5 e 6)
- ALLEGATO B → Schede monografiche dei capisaldi costieri IGM
- ALLEGATO C → Elementi geodetici dei punti trigonometrici costieri dell'IIM
- ALLEGATO D → Schede monografiche delle stazioni di rilevamento dei profili batimetrici luglio 1978
- ALLEGATO E → Calcolo analitico delle coordinate piane Gauss-Boaga delle stazioni campione s3, s16, s24/25, s27
- ALLEGATO F → Dati mareografici
- ALLEGATO G → Tabelle delle correzioni delle letture allo scandaglio per la riduzione al l.m.m.
- ALLEGATO H → Lista di cartografie storiche dal 1553 al 1805 (riportate alcune fotocopiate, il resto è un elenco di quelle visionate con alcuni commenti)

- ALLEGATO I → Carte nautiche e topografiche
- ALLEGATO L → Notizie bibliografiche a carattere generale, sedimentologico e di interventi
- ALLEGATO M → Notizie locali, datazione interventi noti
- ALLEGANTO N → Raffronto storico linee di costa 1891-1978 (N5, N7)
- ALLEGANTO O → Raffronto batimetrie 1822-1978 (17, 18, 23)
- ALLEGATO P → Profili batimetrici a confronto anni 1927 (IIM) – 1950 (IIM) – 1973 (CNR) – 1978 Studio Volta (P6, P7)
- ALLEGATO Q → Livelli al mareografo di Trieste di luglio 1974.

Alcune tra le numerose carte allegate sono state scannerizzate e georiferite.

- *Brambati A., Catani G., Lenardon G., Marocco R., 1982. Consiglio Nazionale Delle Ricerche, Progetto Finalizzato Conservazione del Suolo, Sottoprogetto Dinamica dei Litorale Area Campione Alto Adriatico Rilievi sul litorale da Monfalcone alla foce dell'Adige. Pubblicazione n°170. 15 pp, 52 tavv.*

  Il progetto ha previsto la realizzazione di 51 profili topo-batimetrici tra Monfalcone e il fiume Adige al fine di poter fare considerazioni sull'andamento e sulla futura evoluzione nel tempo dei fondali e di caratterizzare le morfologie anche in relazione alle condizioni meteomarine in atto al momento dei rilievi. I profili sono mediamente intervallati di 2.7 km nelle aree dove è presente una maggior variazione di morfologie, mentre presentano una spaziatura di circa 4 km laddove il litorale è più rettilineo e privo di particolari morfologie.

  Le batimetrie sono state realizzate tra aprile e luglio 1973, con ripetizioni del litorale gradese nel settembre 1973 (sez. 11) e nel giugno 1975 (sez. 9, 10, 12 e 13). Alla fine del documento vengono riportati i profili topografici e batimetrici eseguiti, ma unicamente come grafici senza i riferimenti numerici.

- *Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 1985. Studio sedimentologico e marittimo costiero dei litorali del Friuli Venezia Giulia, ipotesi di intervento per il recupero ambientale e la valorizzazione della fascia costiera. A cura di A. Brambati. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione Regionale dei lavori Pubblici, Servizio dell'Idraulica, Trieste: 67 pp;* nel testo verrà semplicemente richiamato come *Studio Brambati*, 1985.

  Lo studio, commissionato dalla regione FVG all'Università degli Studi di Trieste, presenta un'indagine ad ampio respiro dei litorali regionali con lo scopo finale di proporre delle soluzioni progettuali per il risanamento dei litorali che in quegli anni apparivano in crisi erosiva, soluzioni che fossero correttamente inquadrate in un quadro conoscitivo più ampio. Relativamente a questo studio è stato realizzato un volumetto di sintesi (67 pp) dallo stesso titolo che porta la data 1987, l'intero Studio è invece costituito da una relazione di 665 pagine che è stata reperita in originale e scannerizzata. Delle numerose carte allegate sono state scelte le più rappresentative e importanti, che sono state scannerizzate e georiferite.

  Lo studio comprende una parte generale a carattere regionale in cui è presente una descrizione dello stato del litorale e del suo utilizzo da parte dell'uomo, una sintetica rassegna degli studi svolti in precedenza e una descrizione dei risultati di una serie di studi e indagini a carattere specifico.

  L'analisi a carattere regionale (capitolo 3) comprende:

  - Stato attuale dei litorali e loro utilizzo
  - Studi precedenti (elenco bibliografico)
  - Condizioni meteomarine dell'Adriatico settentrionale
  - Rifrazione del moto ondoso per le varie traversie e analisi dell'energia liberata sotto riva
  - Evoluzione della linea di riva (trattazione sintetica per tratti dei fenomeni individuati)
  - Evoluzione dei fondali (confronto dei valori di profondità)
  - Tessitura e modalità dei sedimenti
  - Zona dinamica della spiaggia sottomarina
  - Composizione mineralogica delle sabbie di spiaggia, trasporto solido fluviale e input terrigeno

- Input organogeni
- L'usura dei sedimenti in ambiente marino
- Il trasporto lungo riva
- Valutazione del rapporto tra input fluviale, input organogeno e dispersione litorale – usura dei sedimenti
- Proposta di normativa e di destinazione d'uso della fascia costiera e litorale.

In secondo luogo lo Studio presenta degli approfondimenti conoscitivi a carattere specifico per i seguenti tratti:

- Tratto dalla foce del Tagliamento a Lignano Riviera
- Isola di Martignano
- Tratto dal Porto canale di Grado al canale di Primero
- Lidi di Staranzano e Marina Julia

Per ciascuno dei tratti appena citati vengono affrontati vari temi e da ultimo proposte delle soluzioni progettuali, alcune delle quelli sono state effettivamente sviluppate nel prosieguo.

Per quel che riguarda il litorale compreso tra Grado e Primero (*Studi e indagini a carattere specifico – da Grado a Primero capitoli 11-17*). Lungo questo tratto di litorale sono state eseguiti:

- Rilievi topo-batimetrici lungo sezioni (25 sezioni dalla battigia alla batimetrica 6m);
- Campionamenti di sedimento superficiale (75 campioni lungo 25 sezioni) ogni metro di profondità dalla battigia fino alla batimetrica -6m, con l'eccezione dell'area della Mula di Muggia prospiciente Punta Barbacale dove invece mancano quasi del tutto;
- Nelle zone di basso fondale tra Punta Barbacale e Primero detta "il Baroso" lo schema di raccolta non ha potuto seguire la profondità ma si sono raccolti 5 campioni tra la linea di riva e il ciglio del banco;
- Origine ed evoluzione storica antica dei litorali gradesi basata sull'analisi di documenti e cartografia storica;
- Evoluzione storica negli ultimi due secoli dei litorali gradesi basata sull'analisi di cartografia storica;
- Evoluzione dei fondali in base ai rilievi batimetrici nel 1927 (carta I.I.M.), nel 1950 (carta I.I.M.), nel 1973 (profili batimetrici CNR), nel 1978 Studio Volta.

- *Studio di Verifica dello stato degli argini della bassa pianura friulana nel tratto compreso tra la foce del f. Tagliamento e Monfalcone con particolare riguardo all'arco lagunare realizzato nel 2007 dal Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine dell'Università degli Studi di Trieste con il coordinamento di A. Brambati per conto della Protezione Civile della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Lo studio aveva lo scopo di indagare lo stato degli argini, la vulnerabilità e la pericolosità delle zone costiere del Friuli Venezia Giulia unitamente al processo di abbassamento dei terrenti per cause naturali ed antropiche.*

  In questo contesto una parte del lavoro è stata dedicata alla definizione delle caratteristiche dei litorali per la quantificazione della vulnerabilità e del rischio da mareggiata. L'analisi è stata realizzata nel 2004 per il tratto di costa da Lignano a Grado e nel 2007 per il tratto da Grado a Monfalcone. Gli elementi considerati per l'analisi della vulnerabilità e del rischio sono: ampiezza della spiaggia emersa, pendenza dei fondali (pf) evoluzione della linea di riva (tendenza recente e storica, trend evolutivo dei fondali, presenza di strutture difensive morbide (dune costiere) e rigide. In collaborazione con OGS di Trieste nell'ambito del *Progetto Nazionale Vector (VulnErabilità delle Coste e degli ecosistemi marini italiani ai cambiamenti climaTici e loro ruolO nei cicli del caRbonio mediterraneo*) sono stati anche realizzati dei rilievi topo-batimetrici che saranno descritti al paragrafo 2.4.

2.2. **Cartografia**

Per questo studio è stata effettuata un'indagine della cartografia storica disponibile, della cartografia degli Istituti Geografici Militari e Istituti Idrografici della Marina, riprendendo anche le analisi di diversi studi precedenti, come lo *Studio Volta* (1979) e lo *Studio Brambati* (1985).
Come riporta anche lo stesso *Studio Volta* (Regione Autonoma del Friuli Venezia Giulia, 1979), con la costituzione degli Istituti Geografici Militari (IGM) e degli Istituti Idrografici della Marina (IIM) sia in Italia che in Austria, dal 1800 in poi le carte sono basate su rilievi geometrici e l'attendibilità della cartografia risulta maggiore rispetto a quella precedente storica. Nonostante ciò, solo confrontando tra loro anche queste carte si possono ricavare informazioni più veritiere: infatti se le carte topografiche sono più ricche di elementi per quanto riguarda le modificazioni del litorale effettuate dall'uomo e le modificazioni del settore "emerso", le carte nautiche dovrebbero fornire informazioni più valide per quanto riguarda i fondali, i banchi, l'evoluzione delle bocche, etc.

A tal proposito, molto accurata è la trattazione della cartografia storica austriaca e del successivo IGM che ne fa il rapporto tecnico *Documenti cartografici per l'interpretazione del regime litoraneo tra l'Isonzo e il Foglia* commissionato dal C.N.R (Varani & Zunica, 1974) come lo è quella dello *Studio Volta* (1979), mentre di particolare unicità è la *Carta corografica del Catasto Franceschino* del 1830 (scala 1:28.800) citata e descritta da Favretto et. al. (2004) e da Timar et al. (2006).

Si riporta di seguito la cartografia più interessante che è stata individuata durante la ricerca. Per l'area che va da Grado alla foce del fiume Isonzo sono disponibili le seguenti carte storiche:

- *Kriegskarte von Zach 1798 – 1805* - Carta del Ducato di Venezia, presente presso la biblioteca di San Giovanni dell'Università degli studi di Trieste nella coedizione della fondazione Benetton del 2005, scala 1:28.800. Le zone di nostro interesse sono rappresentate nelle tavolette XVII 13-14 Grado e XVIII 13 Bocca di Sdoba. Le tavolette sono colorate e molto particolareggiate nella parte a terra, mentre nel settore a mare sono presentati i principali toponimi e il litorale in modo semplificato. Sul quadro di unione le due tavolette sono indicate con datazione incerta, tutta la carta è riferita al 1798-1805.
- *Carta di cabotaggio del mare Adriatico* (Figura 2.1, Figura 2.2), disegnata ed incisa sotto la direzione dello Stato Maggiore Generale dell'I.R. Istituto Geografico Militare di Milano anni 1822 - 1824 (scala 1:175000 con scandagli riportati in piedi francesi; 1 piede francese =32.48 cm). La carta è riportata nel volume di Dorigo (1965), nel rapporto tecnico *Documenti cartografici per l'interpretazione del regime litoraneo tra l'Isonzo e il Foglia* commissionato dal C.N.R (1974) e nello Studio Volta (1979). Trattandosi di una carta a piccola scala le informazioni che se ne possono trarre sono piuttosto generiche (Varani & Zunica, 1974) e non è possibile fare valutazioni di tipo quantitativo. Le tavole a grande scale realizzate per i singoli paraggi comprendono Porto di Grado, Porto Primero e Punta Sdobba. Si tratta di carte molto particolareggiate ma che comprendono troppo pochi elementi a terra per poter essere correttamente georiferite e confrontate con altri documenti cartografici se non a livello qualitativo.

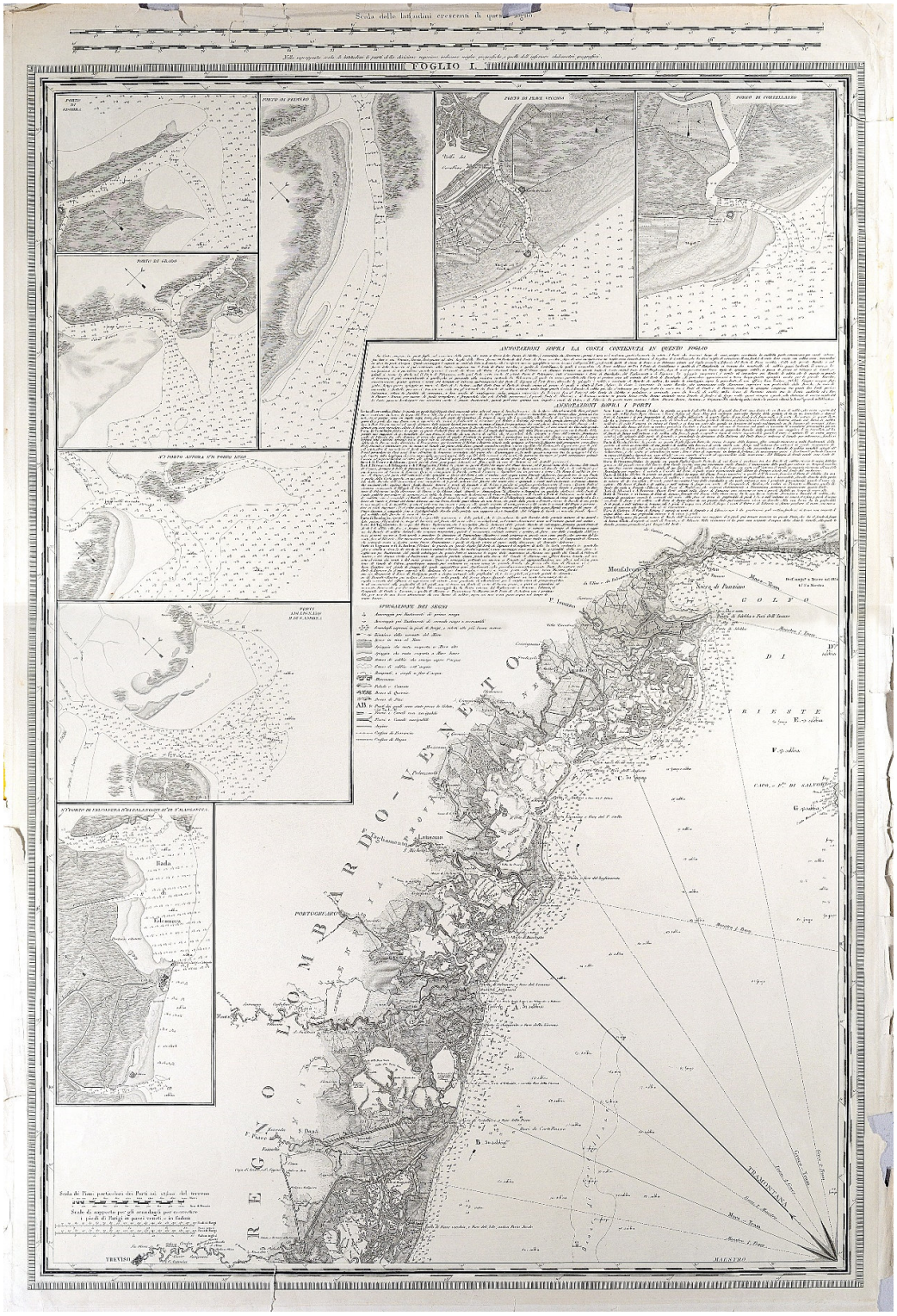


Figura 2.1 - Carta di cabotaggio del mare Adriatico, 1822-1824.

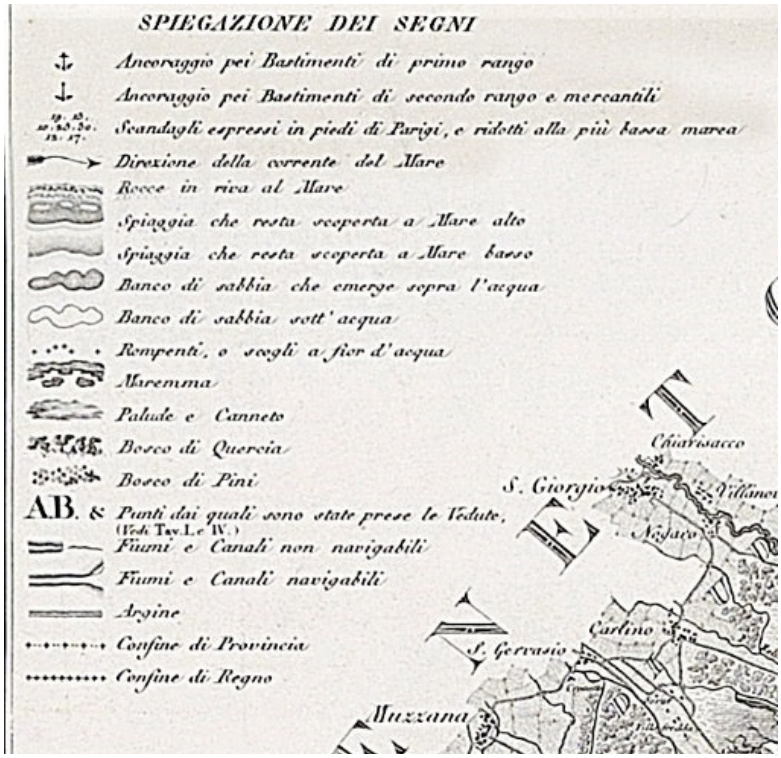


Figura 2.2 - Dettaglio della legenda della Carta di cabotaggio del mare Adriatico, 1822-1824.

- *Carta corografica del Catasto Franceschino (Franziszeische Landesaufnahme)*, del 1830 (Figura 2.3), scala 1:28800, presente presso l'Archivio di Stato di Trieste e consultabile sul sito *MAPIRE The Historical Map Portal* (http://mapire.eu) e da Timar et al. (2006).
- *Carta topografica della Venezia,* del 1849 e rappresentata in scala 1:86400, riportata nello *Studio Volta* (Regione Autonoma del Friuli Venezia Giulia, 1979). La carta, in parte ricavata dalla Carta di cabotaggio del 1822-1827) presenta indicazioni molto stilizzate sia della parte a mare sia di quella a terra; riporta tuttavia la presenza del vecchio canale di Primero. Le batimetrie sono in piedi francesi (1 piede francese = 0.32 cm) ricavate dalla sopra citata carta di cabotaggio.
- Carta *Golf von Trieste*, del 1867 e rappresentata in scala 1:80000, riportata nello Studio Volta (1979); purtroppo la copia riportata nello Studio risulta quasi illeggibile. Questa carta è citata e parzialmente riportata anche da Varani & Zunica (1974): nello stralcio indicato nel testo si descrive come l'Alto Comando della Marina Austriaca abbia riportato diverse isobate (2, 5 e 10m) e frequenti batimetriche, oltre alla localizzazione di numerosi ed estesi banchi sabbiosi.
- Carta *Franzisco – Josephinische Landesaufnahme* (1869-1887) visibile sul sito http://mapire.eu alla voce *The Third Military Survey* (Molnar & Timar, 2009).
- Carta topografica del *Militargeographisches Institut* del 1894/1896 (Figura 2.4), in scala 1:25000, riportata nello *Studio Volta* (Regione Autonoma del Friuli Venezia Giulia, 1979); la tipologia dei fondali è indicata con i seguenti codici S = Sand (sabbia), Sch = Schlamm (fango), F = Fels (roccia), G = Grass (erba / alghe), M = Muscheln (conchiglie).

Figura 2.3 - Stralcio della Carta corografica del Catasto Franceschino, 1830.

Figura 2.4 - Stralcio della carta topografica del Militargeographisches Institut sul Banco della Mula di Muggia riportata in Studio Volta (1979).

Tuttavia, anche queste carte presentano talvolta approssimazioni, morfologie poco veritiere o mancanza di informazioni esaurienti sul Banco della Mula di Muggia. Per un'analisi quantitativa più recente possono essere utilizzate le *Carte topografiche IGM* (Istituto Geografico Militare) in scala 1:25000, che sono state reperite presso l'Università IUAV di Venezia (Tabella 2.1), e le *Tavolette IIM* (Istituto Idrografico della Marina) in scala 1:12000 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Nelle carte IIM la profondità delle batimetriche è espressa in metri rispetto al livello medio della bassa marea sizigiale corrispondente a 52 cm sotto il l.m.m..

Tabella 2.1 - Carte topografiche IGM reperite presso l'Università IUAV di Venezia.

Codice ID	Denominazione	Anno rilievo	Aggiornamento	Note
40IIISO1915	Punta Sdobba	1915		Non viene riportato il Banco della Mula di Muggia, solo la batimetrica -2m.
40IISE1917	Grado	1915	1917	Non viene riportato il Banco della Mula di Muggia, solo la batimetrica -2m.
40IISE1927	Grado	1896-1897	1927, parte a terra	Presente solo il settore più occidentale del Banco, con morfologia del Banco combaciante con quella del 1894
40IIISO1938	Foce dell'Isonzo	1936		Viene indicato il Banco, fatta eccezione per la parte occidentale terminale
40IISE1938	Grado	1896-97	1938	Presente solo il settore più occidentale del Banco, con morfologia combaciante con quella del 1894
40IISE1949	Grado	1896-97	1949	Presente solo il settore più occidentale del Banco, con morfologia combaciante con quella del 1894
40IIISO1949	Foce dell'Isonzo	1938	1949, parte a terra	Viene indicato il Banco, fatta eccezione per la parte occidentale terminale che presenta morfologia combaciante con quella del 1938
40IIISO1959	Foce dell'Isonzo	1959		Viene indicato il Banco, fatta eccezione per la parte occidentale terminale

Tabella 2.2 – Carte I.M.M.

Codice ID	Denominazione	Anno rilievo	Aggiornamento	Note
grado1928	Marina di Grado	1927		Presente solo il settore più occidentale del Banco
grado1939	Marina di Grado	1927	1939	Presente solo il settore più occidentale del Banco che risulta invariato nella sua morfologia rispetto al 1928
grado1949	Marina di Grado	1927	1949	Presente solo il settore più occidentale del Banco che risulta invariato nella sua morfologia rispetto al 1928
grado1959	Marina di Grado	1927	1959	Presente solo il settore più occidentale del Banco che risulta invariato nella sua morfologia rispetto al 1928

Allo scopo di utilizzarle per la ricostruzione dell'evoluzione nel tempo delle morfologie costiere ciascuna carta è stata analizzata in maniera critica e confrontata con le altre informazioni a nostra disposizione ed è stata geo-riferita attraverso il software *ESRI ArcGis for Desktop 10.4*.

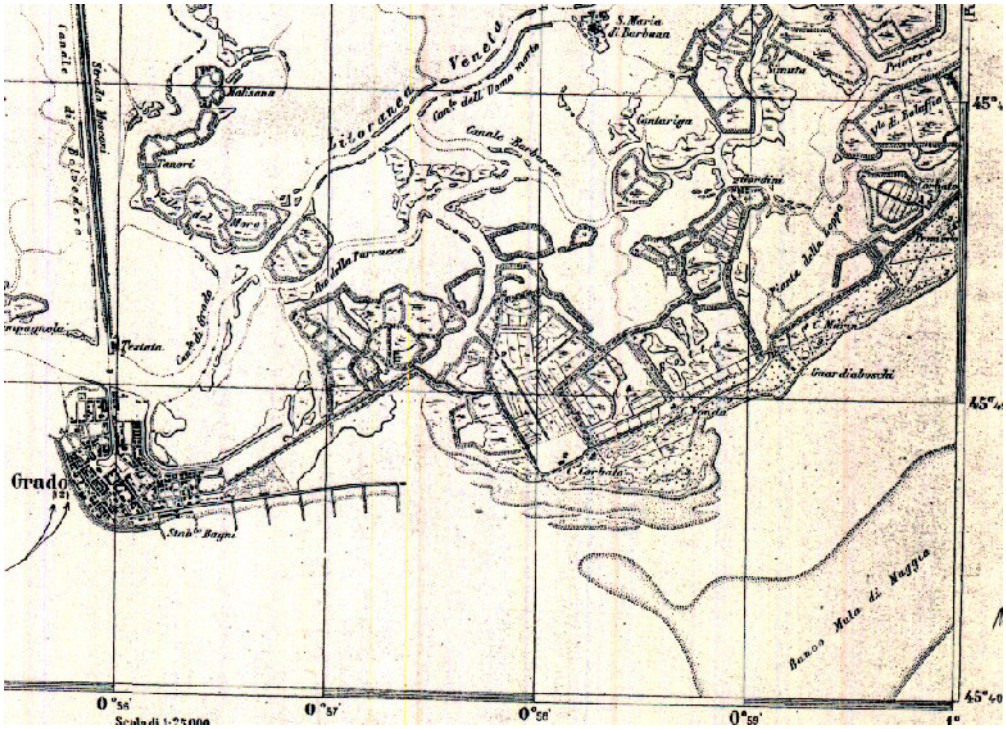


Figura 2.5 - Esempio di rappresentazione del Banco della Mula di Muggia nelle carte topografiche dell'Istituto Geografico Militare (1927).

Rappresentano inoltre strumenti utili le seguenti cartografie:

- *Carta Tecnica Regionale Numerica,* Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, anno 2002;

- *Carta Geologico Tecnica (CGT)* - Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia - Scala 1:5000 gentilmente fornita dal Servizio Geologico.

2.3. **Foto aeree**

Di seguito vengono riportate le foto aeree e ortofoto consultate e utilizzate che coprono l'area di studio:

- **1945**: foto aerea IGM consultata sul sito http://intelspeedcontest2006.tiscali.it/voli/.
- **1954:** fotogrammi in B.N. 23x23 cm (scala nominale 1:35000) acquisiti durante il volo GAI (Gruppo Aereo Italiano) del medesimo anno. I fotogrammi, custoditi presso il Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste, sono stati scannerizzati, georiferiti e mosaicati in ambiente GIS nel corso di precedenti progetti di ricerca. Di queste levate, solo alcuni fotogrammi mostrano l'area della Mula di Muggia antistante Punta Barbacale; nessun fotogramma invece per l'area tra Primero e la foce dell'Isonzo.
- **1961**: foto aerea IGM consultata sul sito http://intelspeedcontest2006.tiscali.it/voli/.
- **1978:** foto aeree prodotte dalla CGR (*Compagnia Generale Riprese-aeree)* per il CNR (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*), in possesso del Dipartimento di Matematica e Geoscienze

dell'Università degli Studi di Trieste. I fotogrammi sono stati scannerizzati, georiferiti e mosaicati in ambiente GIS nel corso di precedenti progetti di ricerca. I fotogrammi riferiti a quest'anno ricoprono l'intera area di studio.

- **1984**: Foto aeree 306-307 della strisciata 18/6/84 della regione Friuli Venezia Giulia, fotogrammi in bianco e nero presenti presso l'archivio dell'IGM, consultabili al sito http://intelspeedcontest2006.tiscali.it/voli/ e riportate in Marocco (2000).
- **1990:** concesse in consultazione dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. I fotogrammi sono a colori, 23x23 cm e fanno parte del volo CGR, lotto 10 Trieste, utilizzati per la redazione della Carta Tecnica Regionale (scala nominale 1:10000). Anche queste sono state scannerizzate, mosaicate e georiferite in ambiente GIS nell'ambito di precedenti progetti di ricerca, sulla base della CTRN (*Carta Tecnica Regionale Numerica*) della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.
- **1997:** orto-foto digitali in B.N. consultate sul sito del Geoportale Nazionale (http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/).
- **2003:** foto aeree scattate in bassa marea gentilmente fornite, in formato digitale georiferito, dall'ARPA FVG (*Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia*). Queste foto non interessano il settore al largo.
- **2003:** orto-foto digitali prodotte dalla CGR e fornite dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Come sopra, queste foto non raggiungono la parte al largo.
- **2007 - 2008:** orto-foto digitali consultate sul sito del Geoportale Nazionale (http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/).
- **2008 - 2010:** orto-foto digitali messe a diposizione dalla Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia realizzate in concomitanza al Volo Lidar, i fotogrammi che riguardano la laguna sono stati realizzati parte nel 2008 e parte nel 2010. Questi voli sono stati utilizzati in parte in quanto non è stata ripresa l'area del Banco della Mula di Muggia.
- **2012:** orto-foto digitali realizzate da Helica Srl su incarico della Protezione Civile FVG, consultate sul webGIS dell'Ente. Questi voli sono stati utilizzati in parte in quanto non è stata ripresa l'area del Banco della Mula di Muggia.
- **2014:** Orto-foto digitali realizzate da AgEA Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura fornite dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Questi dati sono stati completati da mappe Bing in quanto non è stata ripresa l'area del Banco della Mula di Muggia.
- **2017**: immagini Sentinel 2, acquisite il 01/01/2017 con risoluzione a 10m, consultate presso il server di ESA (https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel_data_access.
- **2018:** immagini Sentinel 2, codice S2B_N0206_R122_T33TUL_Z0180210T120626, acquisite il 10/02/2018 con risoluzione a 10m, consultate presso il server di ESA (https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel_data_access).

Le foto sono state utilizzate per riconoscere e digitalizzare le forme, individuare le modificazioni antropiche e per interpretare i fenomeni in atto. Una parte di esse, specificata nel capitolo 3, è servita per la mappatura delle forme nel tempo, nell'individuazione di alcuni indicatori geomorfologici e per coadiuvare l'analisi quantitativa e di bilancio. Di queste ultime foto è stata controllata la georeferenziazione, e in alcuni casi sono state georiferite ex novo.

2.4. **Rilievi topo-batimetrici dei litorali**

Per quel che riguarda l'area compresa tra Grado e la foce del fiume Isonzo, sono disponibili quattro levate topo-batimetriche realizzate rispettivamente nel 1968 (rilievo CNR - Gruppo di Studio dei Litorali), 1979 (rilievo commissionato allo Studio Volta dalla Regione Autonoma del Friuli Venezia Giulia), 1985 (Studio Brambati – Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione Regionale dei lavori Pubblici, Servizio dell'Idraulica, 1985) e nel 2007 (nell'ambito del Progetto Nazionale V.E.C.T.O.R. - *Vulnerabilità delle coste e degli ecosistemi marini italiani ai cambiamenti climatici e loro ruolo nei cicli del carbonio mediterraneo a cura dell'Università degli Studi di Trieste e dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale)*.

Di seguito una breve descrizione dei rilievi.

Rilievi del 1968

I profili del 1968 sono stati eseguiti nel periodo agosto-settembre per conto del Consiglio Nazionale delle Ricerche, Gruppo di Studio dei Litorali, consistono in 54 sezioni fino alla profondità di 10 m che coprono tutto il litorale compreso tra la foce del Timavo e la foce del Tagliamento.

La documentazione dei rilievi è stata raccolta in quattro volumi ripartiti nel seguente modo:

- Nel primo volume è contenuta la corografia alla scala 1:10.000 rappresentante la fascia costiera per una profondità media di 100-150 metri ed il rilievo batimetrico sino alla profondità di 10 m con curve di livello equidistanziate ogni metro. Sulla carta sono riportate le linee di scandaglio, normali alla costa, mediamente una ogni chilometro.
- Nel secondo volume sono raccolte le monografie degli estremi di sezione ed una corografia alla scala 1:25.000.
- Nel terzo e nel quarto volume, infine, sono raccolte tutte sezioni eseguite (dal profilo 1 al profilo 54) restituite graficamente alla scala 1:100 per le altezze e 1:1000 per le distanze per la parte a terra e per il fondo marino fino alla profondità di circa 3 m, mentre per la sezione completa riferita alla profondità di circa 10 m la scala adottata per le altezze rimane invariata mentre quella per le distanze è in scala 1:10000.

In questo lavoro sono stati utilizzati 15 profili topo-batimetrici acquisiti nell'area d'interesse, distanziati fra loro di circa 1 km e lunghi tra 3 e 5 km (Figura 2.6).

Rilievi del 1973-75

La serie di profili eseguiti negli anni 1973-75 dall'Unità Operativa dell'Istituto di Geologia e Paleontologia dell'Università di Trieste sui litorali dell'Adriatico Settentrionale tra Monfalcone (Gorizia) e il fiume Adige, nell'ambito del *Programma di Ricerca sul Regime dei Litorali Italiani - Sottoprogetto "Dinamica dei Litorali (P.F. Conservazione del Suolo) Consiglio Nazionale delle Ricerce (C.N.R.)*.

Sui litorali in esame, per una lunghezza complessiva di 145 km, sono state realizzate 51 sezioni in modo da ricoprire uniformemente l'intero arco di litorale (Figura 2.7). In prossimità delle foci fluviali e di quelle lagunari i profili sono stati eseguiti con minor spaziatura (circa 2.7 km), mentre nei tratti di litorali più rettilinei e privi di particolari morfologie è stata fissata una maggior distanza (circa 4 km). I profili sono stati eseguiti perpendicolarmente alla linea di riva fino alla profondità di 8 m circa.

Figura 2.6 - Ubicazione dei profili del 1968 utilizzati in questo Studio.

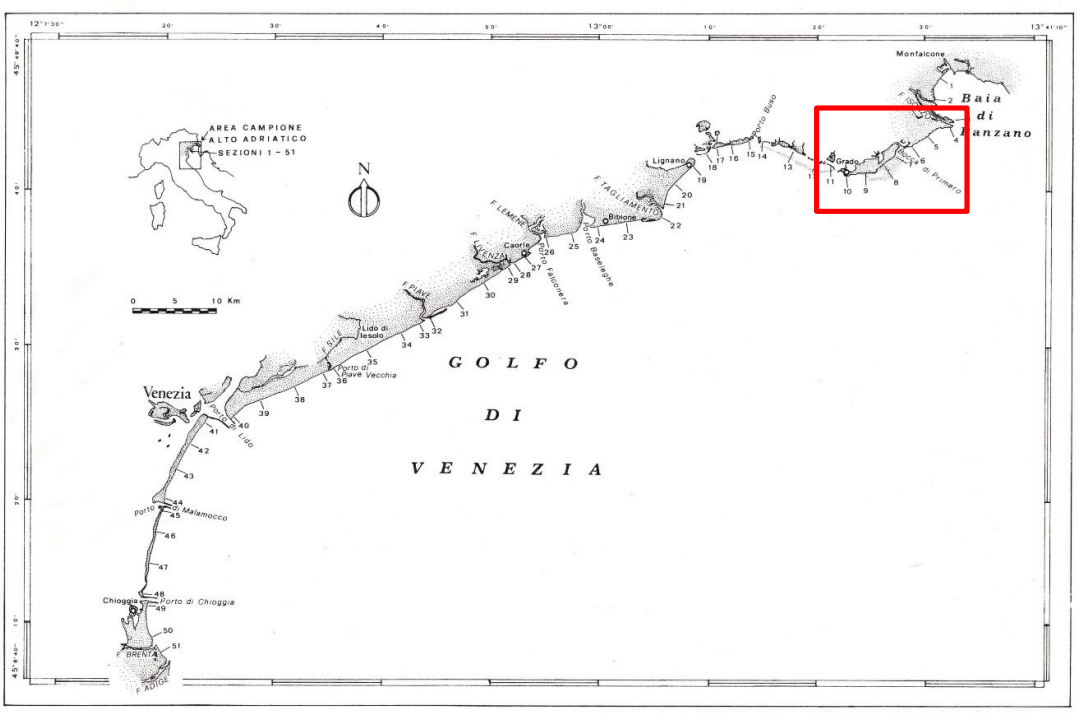


Figura 2.7 - Rilievi topo-batimetrici eseguiti dalla U.O. dell'Istituto di Geologia nel 1973-75, nel riquadro rosso viene indicata l'area di interesse per questo Studio.

Rilievi del 1979

Ulteriori rilievi batimetrici sono stati realizzati nel 1979 nell'ambito dello *Studio Volta* (1979) descritto al paragrafo 2.1. I rilievi sono stati eseguiti nelle medesime posizioni di quelli già effettuati dal C.N.R. nella

zona nel periodo 1973-75. Nella campagna di rilievo 1973-1975 sono stati materializzati dei caposaldi di riferimento altimetrico e planimetrico, mediante chiodi inseriti in manufatti o con paletti metallici, utilizzati sia per il rilievo topografico sia per quello batimetrico. Questi ultimi sono stati necessari, come punto di riferimento, per l'esecuzione e ripetizione dei profili condotti dalla Studio Volta snc. Sono stati ripetuti, sulla traccia di quelli già esistenti (C.N.R. 1973-75) 22 profili, il più possibile coincidenti per l'intero tratto costiero delle Regione Friuli Venezia Giulia.

In questo lavoro sono stati consultati 8 profili topo-batimetrici acquisiti nell'area d'interesse, distanziati fra loro di circa 2 km e lunghi tra 2 e 3 km (Figura 2.8).

Rilievi del 1985

Nel 1985 è stata effettuata un'altra levata topo-batimetrica nell'ambito dello *Studio Brambati (1985) già descritto al paragrafo 2.1.* Il protocollo metodologico utilizzato per la realizzazione dei rilievi batimetrici è quello adottato per i rilievi eseguiti nel 1973-75. In questo lavoro sono stati utilizzati 35 profili topo-batimetrici acquisiti nell'area d'interesse, distanziati fra loro da poche centinaia di metri a oltre 2 km e lunghi tra 1.5 e 4 km (Figura 2.9).

Rilievi del 1997

Nel 1997 a seguito di una indagine sull'area di Punta Barbacale sono stati eseguiti una serie di rilievi batimetrici per conto della Direzione Regionale dell'Ambiente del FVG per *L'intervento sperimentale nell'ambito del Piano di risanamento del Mare Adriatico* predisposto da A. Brambati. 7 profili (Figura 2.10) sono stati eseguiti ad aprile 1997 dal geom. Aldo Olivotto in corrispondenza di quelli del 1985 (*Comune di Grado - Rilevamenti batimetrici e morfologici litorale Pineta*).

Figura 2.8 - Ubicazione dei profili del 1979.

Figura 2.9 - Ubicazione dei profili del 1985.

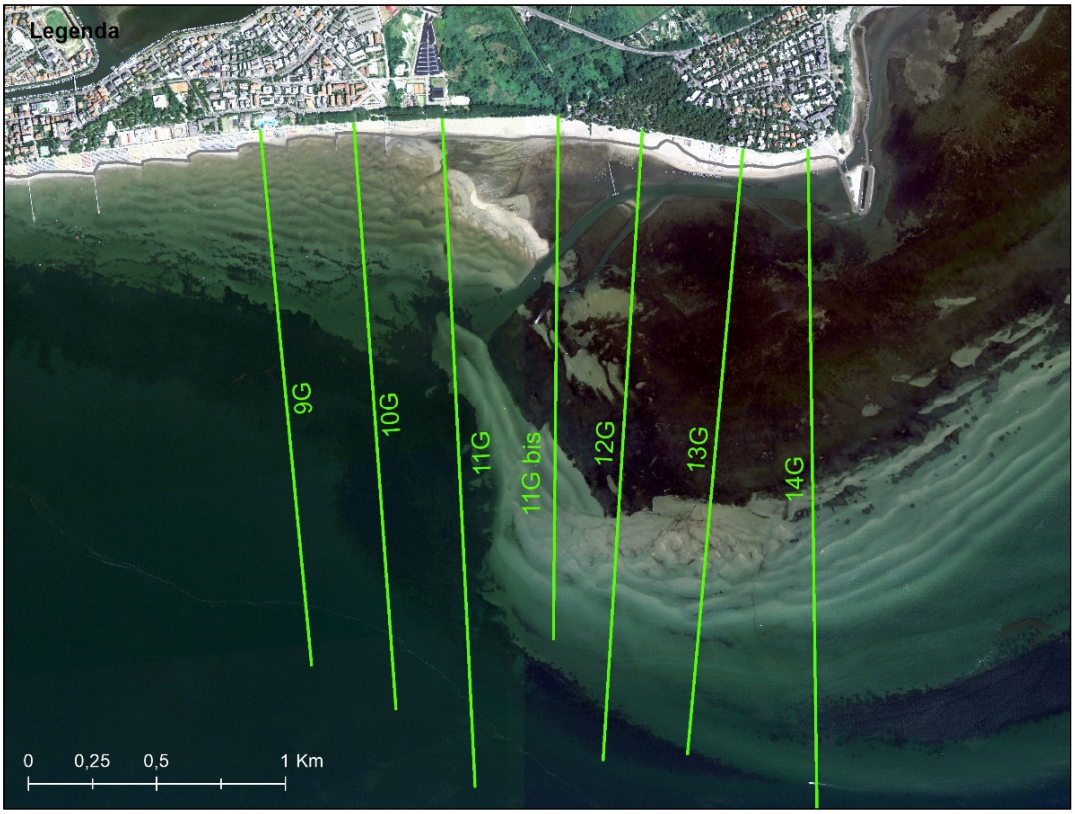


Figura 2.10 - Ubicazione dei profili del 1997.

Rilievi del 2007

Nell'ambito del Progetto Vector - attività per la "*Definizione della vulnerabilità e del rischio da mareggiata nel tratto di litorale compreso tra Grado e Monfalcone"* e in collaborazione tra il nostro dipartimento e O.G.S. (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale) di Trieste è stata effettuata una campagna di rilievo topo-batimetrico nel tratto di litorale in oggetto con lo scopo di ottenere dati aggiornati per la quantificazione delle variabili da inserire nel database per la definizione della vulnerabilità e del rischio (pendenza spiaggia sottomarina, evoluzione dei fondali).

La campagna topo-batimetrica è stata eseguita nel periodo compreso tra il 22 giugno e il 13 luglio 2007 per un totale di 45.5km di rilievo lungo 16 profili dalla spiaggia emersa fino almeno al raggiungimento della batimetrica -5m. La posizione e l'orientazione dei profili è stata scelta in modo tale da consentire la sovrapposizione con i profili della campagna di rilievi eseguiti per conto del Consiglio Nazionale delle Ricerche, Gruppo di Studio dei Litorali, nel 1968. I profili scelti pur essendo in numero inferiore a quelli rilevati nel 1968, sono stati considerati sufficienti alla caratterizzazione morfologica dei tratti costieri considerati. I profili topografici sono stati rilevati con un sistema GPS con sistema differenziale a singola frequenza di tipo "post-processing" per la parte a terra, mentre con un ecoscandagli digitale Garmin un sistema DGPS per la parte a mare. I profili sono stati riferiti infine ai caposaldi che fanno parte della rete di livellazione misurata dal Prof. Marchesini nell'ambito dell'*Indagine sullo stato degli argini della bassa pianura tra le foci del Tagliamento e del Timavo, con particolare riferimento all'arco lagunare*, studio eseguito per conto della Regione Friuli Venezia Giulia nel 2005.

In questo lavoro sono stati utilizzati 11 profili topo-batimetrici acquisiti nell'area d'interesse, lunghi tra 3 e 5 km (Figura 2.11).

I profili relativi agli anni 1968, 1979, 1985, 1997 e 2007 sono stati digitalizzati, georiferiti e inseriti in un database geografico, nella Figura 2.11 si riporta una loro rappresentazione spaziale di sintesi.

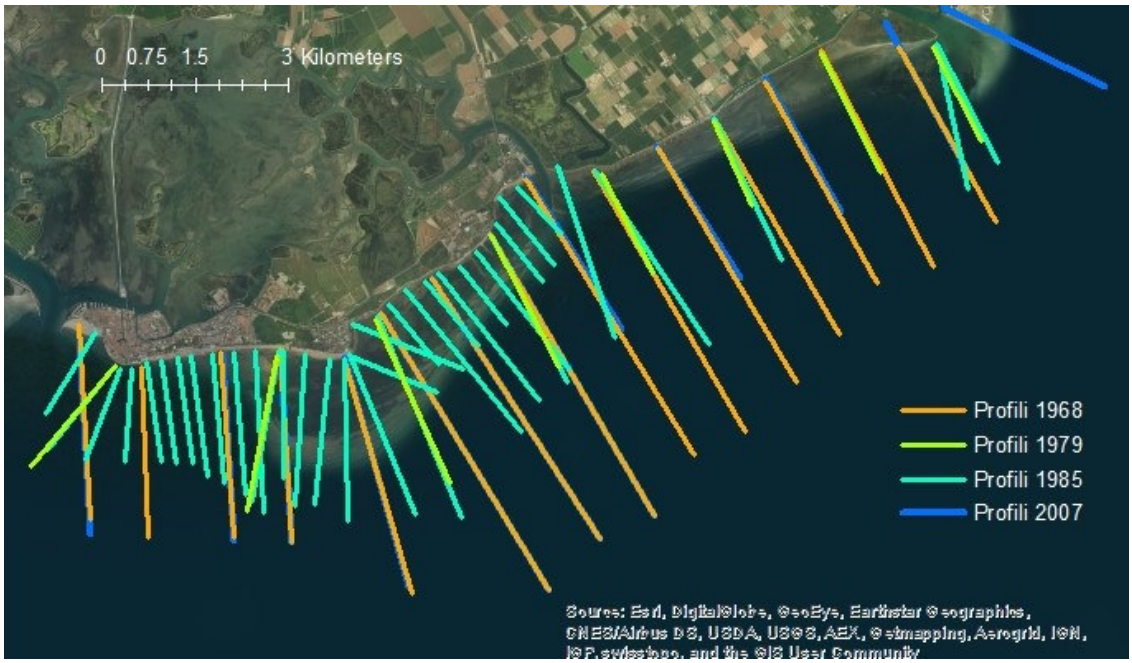


Figura 2.11 - Rilievi topo-batimetrici a disposizione per l'area di interesse.

2.5. **Sedimentologia**

Dal punto di vista sedimentologico il riferimento del paraggio è dato dalla Carte Sedimentologica dell'Adriatico Settentrionale (Brambati et al., 1988, Figura 2.13) di recente solo in parte aggiornata dalla carta di Gordini et al. (2003, Figura 2.12) che però non riporta le stazioni di campionamento nè le date di aggiornamento.

Nello *Studio Brambati* (1985) sono presenti una serie di carte sedimentologiche per l'area in esame (diametro medio in phi, % di sabbia, silt argilla) basate sui campionamenti del 1985 e di quelli realizzati dal CNR nel 1972-73. Uno stralcio della cartografia relativa all'andamento dei valori di diametro medio è riportata in Figura 2.13, mentre in Figura 2.14 sono riportate le distribuzioni delle diverse percentuali di contenuto in sabbia.

Successivamente a questi dati non vi sono dati aggiornati che coprano l'area di studio. Una campagna di raccolta di dati sedimentologica è stata eseguita nel 1997 (Marocco, 2000) per una porzione ristretta del litorale relativa al settore occidentale e centrale della Spiaggia Principale dell'APT di Grado e Aquileia.

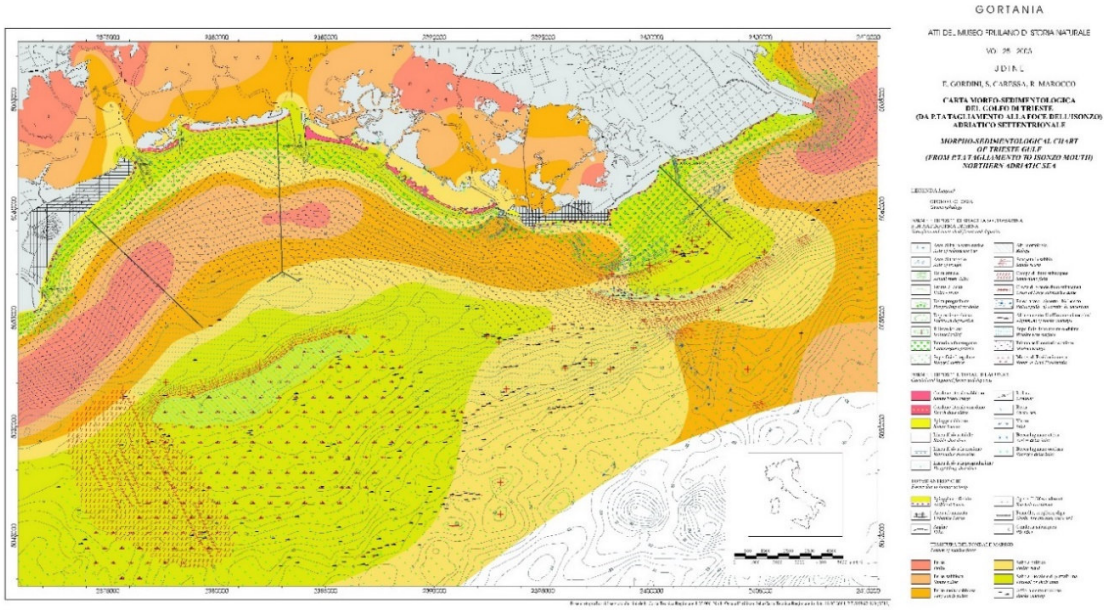


Figura 2.12 - Carta morfosedimentologica dl Golfo di Trieste (tratta da Gordini et al. 2013).

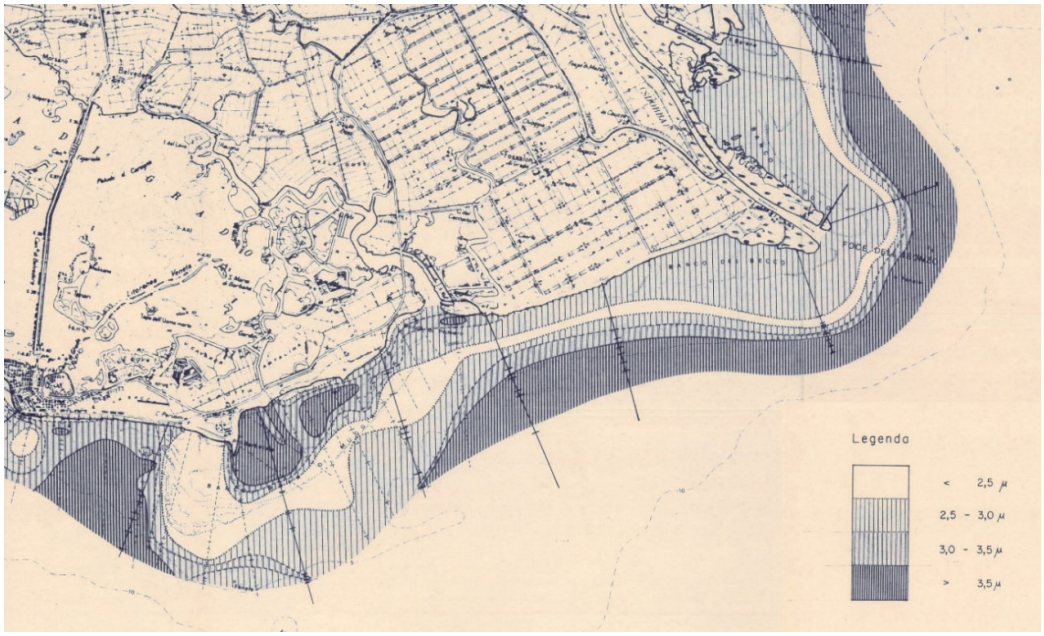


Figura 2.13 – Carta sedimentologica che riporta i valori di diametro medio (MZ) per l'area in esame (da Studio Brambati, 1985), i valori sono espressi in unità phi.

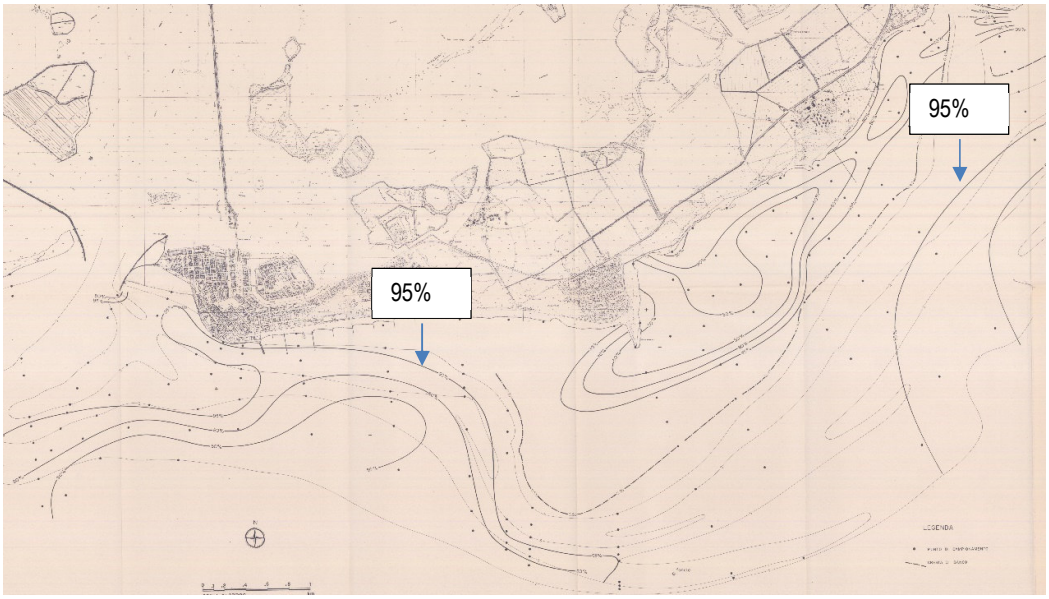


Figura 2.14 - Carta sedimentologica che riporta i valori di percentuale di sabbia nei sedimenti (da Studio Brambati, 1985).

3. Analisi degli aspetti morfologico – evolutivi

3.1. Evoluzione del litorale su base cartografica (periodo 1800-1949)

Per ciascuna carta storica presa in esame per il periodo 1800 – 1949 il cui elenco completo e le principali caratteristiche sono indicate nel paragrafo 2.2, riportiamo di seguito una breve descrizione degli elementi di rilievo riscontrati, sia rispetto agli aspetti geomorfologici e sia a quelli di modificazione del territorio.

Per quel che riguarda gli interventi antropici effettuati nel corso del tempo nello *Studio Brambati* (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 1985) si sottolinea la difficoltà di reperire informazioni e dati certi. Alle informazioni riportate nello *Studio Brambati* (1985) e ad altre fonti bibliografiche (De Grassi & De Grassi, 1957; Studio Volta, 1978; Gatto & Marocco, 1992; Marocco, 2000) abbiamo comunque attinto per completare la descrizione.

Per maggiore chiarezza la descrizione è stata organizzata suddividendo il litorale in 5 tratti, da ovest a est (Figura 3.1):

- tratto1: dalla bocca di porto di Grado alla fine del murazzo
- tratto 2: comprendente la spiaggia principale di Grado
- tratto 3: comprendente la spiaggia di Grado Pineta
- tratto 4: comprendente il litorale a est di Grado Pineta fino a Primero,
- tratto 5: da Primero alla foce dell'Isonzo

Un sesto elemento è costituito dal Banco della Mula di Muggia.

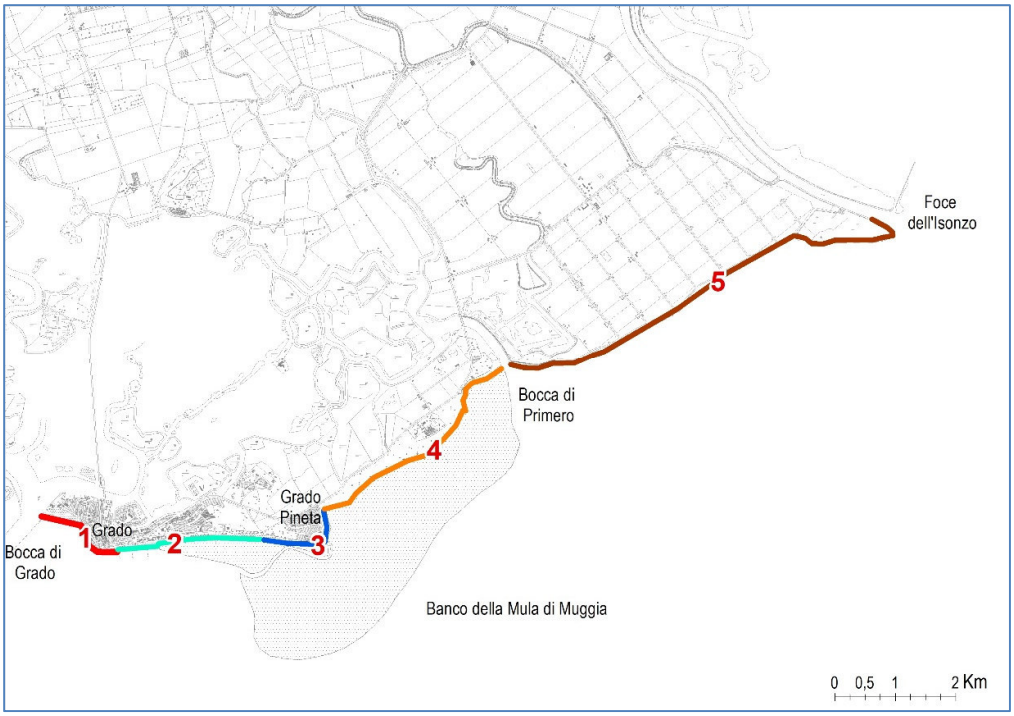


Figura 3.1 – Suddivisione in tratti del litorale.

3.1.1. 1798 – 1805 Kriegskarte von Zach

Tutto il litorale da Grado a Primero appare costituito da un banco sabbioso emerso (isola barriera) ampio tra 200 e 500 m, alle spalle la laguna è caratterizzata da ampie aree a barena, canali e bassi fondali.

Grado (tratto 1): la bocca di Grado si presenta molto ampia e il canale esterno ha un andamento est - ovest, è visibile il centro storico della cittadina di Grado, di piccole dimensioni e fronteggiato verso mare da una spiaggia sabbiosa che si prolunga verso ovest con uno *spit* che termina nel *Porto di Grado*. Qui confluiscono 3 canali: da ovest il *Canale di S. Piero d'Orio*, da nord - est il *Canale dei Burchielli* e da est un piccolo canale senza nome che costeggia il retro-banco per poi confluire verso nord nel *Canale dei Burchielli* e che per un tratto corrisponde all'attuale mandracchio di Grado.

Grado spiaggia (tratto 2): l'isola barriera, ampia in media 200 m, appare continua fino all'attuale Grado Pineta, alle sue spalle è visibile il corso meandreggiante del *canale dei Moreri* che però non ha uno sbocco a mare.

Grado Pineta (tratto 3): non è rappresentato il promontorio di Grado Pineta, ma la linea di riva piega leggermente verso nord - est. Davanti alla spiaggia è indicato un basso fondale ampio circa 300 m e poco a est dell'attuale Punta Barbacale è indicato lo sbocco a mare del *Canale di Premero* indicato di una certa importanza e con la dicitura *Porto di Premero.*

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): l'isola barriera appare piuttosto ampia (da 250 a 400 m) e si estende verso est fino alla *Punta della Rotta,* laddove incontra il corso del canale *Ara della Rotta* che con un varco di circa 300 m la separa da un'altra piccola porzione di isola barriera dove sono collocati i *Casoni di Premero*. Quest'ultima costituisce la riva occidentale del canale di Primero, che in posizione all'incirca corrispondente a quella della bocca attuale mostra un cambio di direzione: da nord-ovest / sud est compie una breve curva e si dirige verso sud-ovest. Subito dopo trova confluenza sul lato sinistro con il canale Averto e si allunga poi sui fondali antistanti parallelamente alla linea di riva per circa 3 km, fino al già citato *Porto di Premero*. Il corso del canale risulta separato dalla spiaggia da un basso fondale denominato *il Dosso*. Verso mare invece il canale risulta protetto da uno spit emerso e da un banco sommerso denominato *La Muggia*. Si tratta quindi del Banco della Mula di Muggia che però in questa carta è rappresentata di dimensioni molto ridotte (l'ampiezza si riduce a 140 m in corrispondenza della fine del canale di Primero) e con una morfologia stretta e allungata nella direzione del trasporto longshore prevalente.

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): la spiaggia appare più sottile con un retro-barriera completamente coperto di aree barenicole e paludose, in particolare è ben visibile la *Palude del Averto* che costeggia sul lato destro il corso meandreggiante del canale omonimo. Più a nord interrompe la continuità del litorale il *Canale di Golametto* che termina in mare dopo un breve corso meandreggiante. Da Golameto a Sdobba la spiaggia è assente. La foce dell'Isonzo (*Bocca di Sdoba*) appare leggermente arcuata verso sud. A ovest della Foce di Sdobba è visibile il canale, di ridottissima ampiezza, dell'Isonzo Vecchio, che assieme alla parte più a monte, denominata Isonzato, costituiva il ramo di foce principale dell'Isonzo fino alla prima metà del 1600 (Desio, 1922).

Come già accennato questa carta si presenta molto semplificata per quel che riguarda i fondali e la parte a mare pertanto riteniamo che le dimensioni del Banco non siano veritiere, bensì rimanga importante il suo andamento, confermato come vedremo più avanti sia dalle altre carte sia da evidenze morfologiche dei fondali.

3.1.2. 1822 -1824 Carta di cabotaggio del mare Adriatico

Uno stralcio della carta è riportato in Figura 3.2 con sovraimposti i tratti di litorale con la loro conformazione attuale.

Grado (tratto 1): la bocca di Grado si presenta ampia circa 400 m con profondità massima di 10.5 m (33 piedi francesi), il canale esterno appare piuttosto breve con andamento NE-SW. Lo spit a ovest della cittadina di Grado appare separato da quest'ultima dallo sbocco a mare del piccolo canale individuato nella carta precedente.

Grado spiaggia (tratto 2): il litorale appare diviso in due parti da una rotta con sbocco a mare del Canale dei Moreri (*Rotta dei Moreri o delle Fontane*). I fondali antistanti sono indicati con alternanza di fango (*creta*) e sabbia. La batimetrica -3 m si presenta a una distanza minima di 500 m circa in corrispondenza della rotta per piegare subito verso mare seguendo verso est il bordo del Banco della Mula di Muggia.

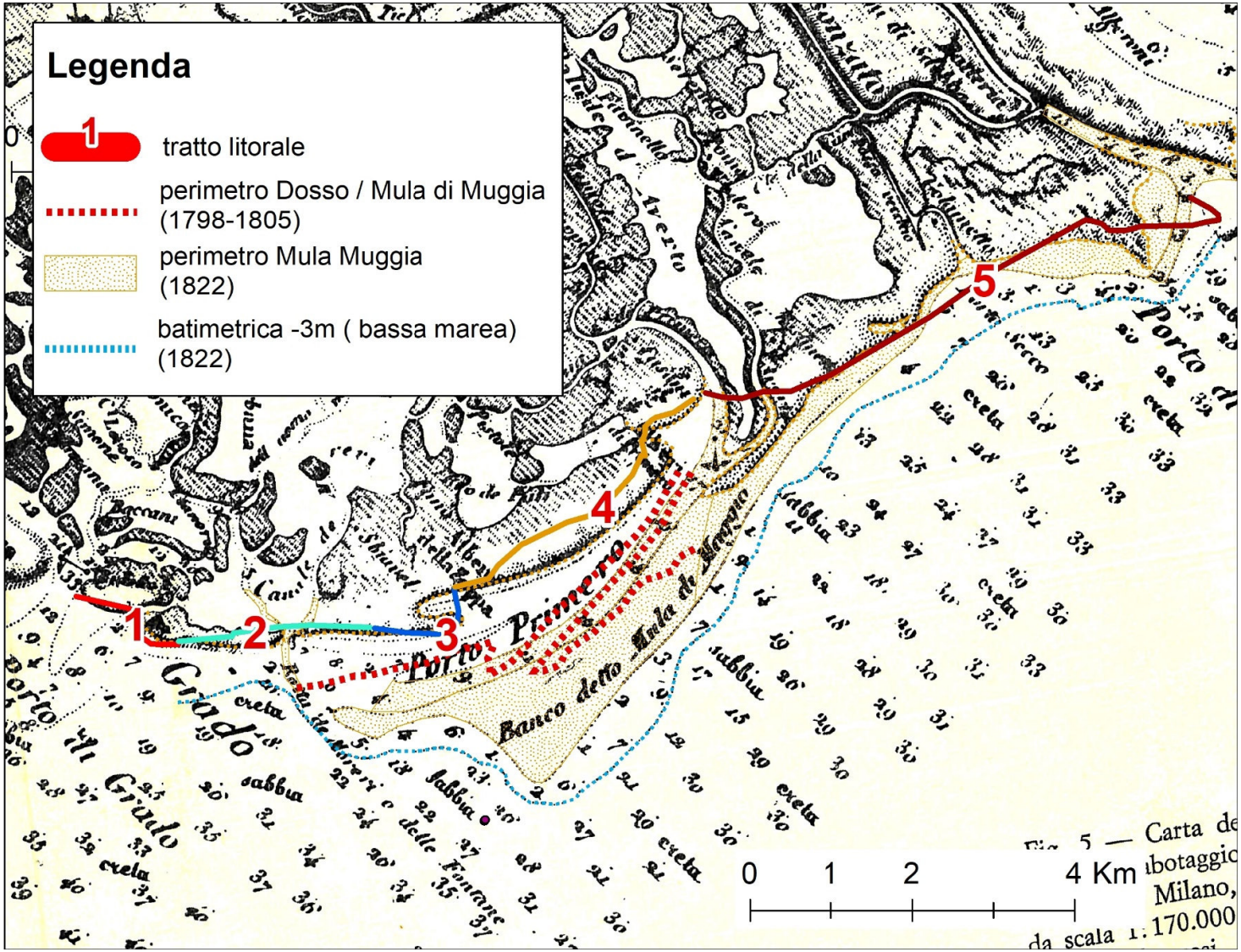
Grado Pineta (tratto 3): in corrispondenza dell'attuale abitato è presente un promontorio con andamento ovest – est con un'insaccatura alle spalle.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): la conformazione della Bocca di Primero è molto simile a quella raffigurata nella carta precedente, il canale esterno appare però molto più sviluppato verso est, trattandosi di una cartografia il cui scopo è molto diverso rispetto alla precedente è difficile capire se si tratta di una modificazione avvenuta oppure se la carta precedente era semplicemente troppo approssimativa. Il canale si allunga per circa 5 km parallelamente alla linea di riva ed è separato dalla spiaggia da un basso fondale e presenta profondità comprese tra 5.8 e 2.9 m (in bassa marea).

Banco della Mula di Muggia (indicato come *Banco detto Mula di Muggia)* appare disegnato con più precisione rispetto alla cartografia precedente: indicato con la simbologia che lo identifica come "banco di sabbia sott'acqua", risulta in continuità con i bassi fondali antistanti la linea di riva che sono presenti fino a Punta Sdobba, e si sviluppa parallelamente al canale di Primero. Verso mare assume una forma arcuata con apice rivolto a sud, la sua estensione risulta pari a 615 ha. Per i tratti 2, 3 e 4, la linea che lo delimita dista dalla costa 1400 -1500 m, mentre raggiunge la massima distanza (2500 m) su un allineamento posto poco a est dell'attuale Punta Barbacale.

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): la conformazione del litorale appare molto simile a quella descritta precedentemente fatta eccezione di uno sdoppiamento della foce alla Sdobba con, oltre alla foce preesistente (*Porto di Sdobba*), la formazione / taglio di una nuova uscita in direzione sud - est denominata *Bocca falsa di Sdobba*.

Figura 3.2 – Stralcio della Carta di cabotaggio del mare Adriatico del 1822-1824 per il litorale compreso tra Grado e Punta Sdobba. Alla carta sono stati sovrimposti i tratti di litorale con la conformazione attuale e i limiti del banco della Mula di Muggia indicati nella carta del von Zach.



3.1.3. 1830 Carta Corografica del Catasto Franceschino

La conformazione del litorale è molto simile a quella della carta precedente pur essendo diversi gli scopi della carta, di particolare interesse (Figura 3.3) la rappresentazione del Banco della Mula di Muggia (indicato qui con il solo termine *Secca)* che ha una conformazione molto simile a quella precedente e l'importanza data alla *Rotta dei Moreri* e al *Porto di Primero,* posto a circa 700m dalla linea di riva davanti all'attuale litorale di Grado Pineta. A est di Punta Sdobba il canale della Quarantia è rappresentato come un piccolo canale di marea che drena l'area barenicola subito a est dell'Isonzo (Figura 3.4).

Figura 3.3 – Stralcio della Carta corografica del Catasto Franceschino (Archivio di Stato di Trieste) per la parte di litorale compreso tra la Bocca di Grado e quella di Primero.

Figura 3.4 - Stralcio della Carta corografica del Catasto Franceschino (Archivio di Stato di Trieste) per la parte di litorale prospiciente la Foce dell'Isonzo (Punta Sdobba).

3.1.4. 1849 Carta topografica della Venezia

Essendo questa carta in parte ricavata dalla carta di cabotaggio del 1822-24 (le batimetrie) non sono presenti modificazioni nella parte a mare e nello stesso tempo la parte a terra è assai poco dettagliata.

3.1.5. Carta Franzisco – Josephinische Landesaufnahme (1869-1887).

Consultata sul portale *The Historical Map Portal* (http://mapire.eu/) alla voce *The Third Military Survey,* la Carta *Franzisco – Josephinische Landesaufnahme* (1869-1887). Il Banco della Mula di Muggia non è disegnato.

Grado (tratto 1): la cittadina di Grado appare un po' ampliata, è rappresentata una parte dell'attuale mandracchio e la spiaggia davanti all'abitato appare ridotta ed è rappresentata l'attuale diga ("murazzo"), (

Figura 3.5). Quest'opera, a difesa dell'abitato era stata realizzata tra il 1860 (primo lotto) e il 1885 (Marocco, 2000).

Grado spiaggia (tratto 2): entrambi i rami del Canale dei Moreri appaiono sbarrati da un lungo argine risalente al 1875 (Marocco, 2000).

Grado Pineta (tratto 3): la conformazione della linea di riva è molto simile alla precedente: il promontorio di Grado Pineta appare ben visibile a delimitare una piccola baia a bassi fondali. Le aree alle spalle della

spiaggia, che nella cartografia precedente erano indicate come barenicole / lagunari appaiono interessate da diffuse bonifiche e arginature di valli da pesca.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): le aree alle spalle della spiaggia appaiono interessate da diffuse bonifiche e arginature di valli da pesca. La Bocca di Primero mostra un nuovo ramo diretto al largo ad interrompere il sistema di banchi che facevano capo all'ala sud orientale della foce dell'Isonzo (Figura 3.6). Il canale originario si mostra di larghezza e profondità ridotte. Nello Studio Volta viene indicato questo ramo come di origine artificiale; secondo lo Studio Brambati intorno al 1870 la bocca di Primero si aprì un varco spontaneo direttamente al mare mentre nel 1934 la rotta precedente venne consolidata artificialmente.

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): subito a est della Bocca di Primero è presente uno sbocco a mare del Canale Averto che precedentemente confluiva nel canale di Primero prima del suo sbocco a mare (Figura *3.6*). In tutto questo tratto la linea di riva appare arretrata rispetto alla precedente, in corrispondenza del canale di Golametto appare una baia piuttosto ampia. La bocca di Sdobba si presenta rivolta verso sud - ovest e non mostra più traccia del ramo diretto verso sud visibile nella cartografia precedente. È di questo periodo, tra il 1869 e il 1880 secondo Desio (1922); nel 1896 secondo De Grassi & De Grassi (1957) il collegamento in seguito a una piena tra l'Isonzo e il piccolo corso d'acqua preesistente a est detto della Quarantia o Correntia. In effetti nella carta è visibile un collegamento tra il fiume Isonzo e il piccolo canale della Quarantia, ma esso appare ancora di minore entità (Figura 3.8).

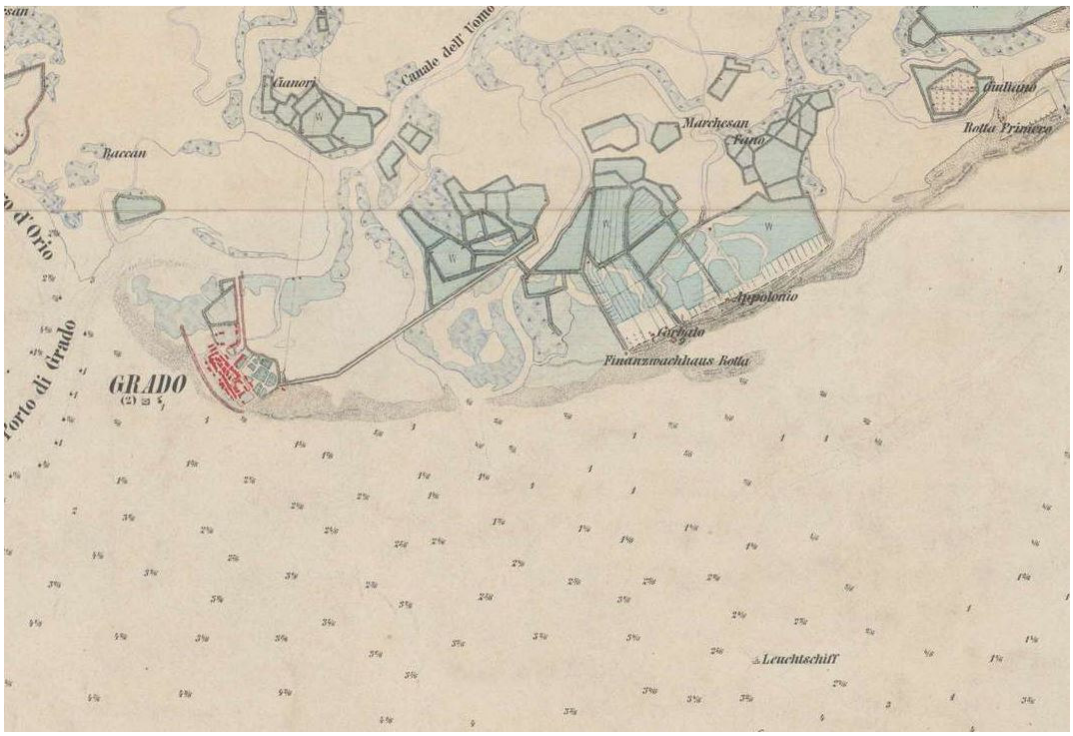


Figura 3.5 - Stralcio della Third Military Survey Map (1869-1887) per il tratto di Grado e grado Pineta (fonte http://mapire.eu/en/).

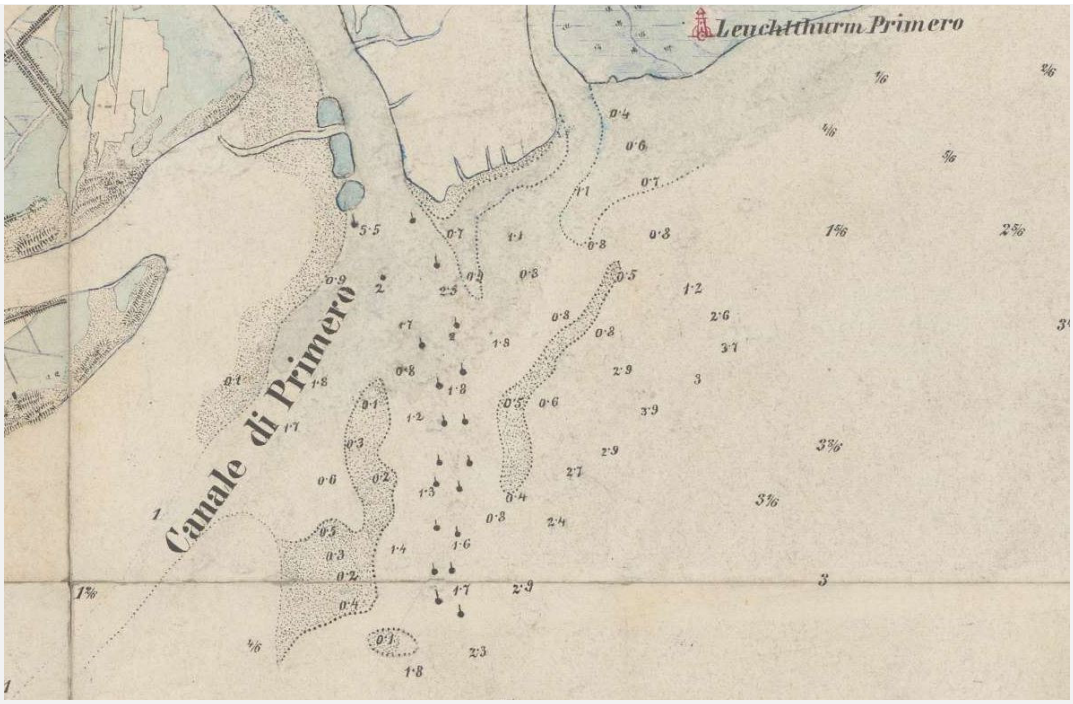


Figura *3.6 – Stralcio della Third Military Survey Map (1869-1887) per l'area del canale di Primero (fonte* http://mapire.eu/en/).

Figura 3.7 - Stralcio della *Third Military Survey Map* (1869-1887) per il tratto da Primero a Punta Sdobba (fonte http://mapire.eu/en/).

Figura 3.8 - Stralcio della Third Military Survey Map *(1869-1887) per l'area Sdobba - Canale della Quarantia (fonte http://mapire.eu/en/).*

3.1.6. 1894 Carta topografica del Militargeographisches Institut

Grado (tratto 1): la conformazione complessiva del centro storico appare più simile all'attuale, sono disegnati il mandracchio e l'attuale diga ("murazzo"), non c'è spiaggia davanti all'abitato, bensì un basso fondale che raggiunge un'ampiezza minima di circa 100 m in corrispondenza del limite più orientale del murazzo (Figura 3.9).

Grado spiaggia (tratto 2): il litorale appare fortemente arretrato sia rispetto alla posizione attuale sia rispetto alla linea di riva del 1822, il fulcro di questo arretramento appare proprio la rotta del Canale dei Moreri. La futura spiaggia principale di Grado appare ancora divisa in due parti e assume la forma uncinata tipica delle aree di rotta. Varie arginature sono presenti alle spalle della spiaggia per tutto il tratto (Figura 3.9). Risale inoltre a questo periodo il primo utilizzo balneare della spiaggia nella sua porzione occidentale (Marocco, 2000), dove infatti in carta si trova l'indicazione *Seebad*.

Grado Pineta (tratto 3): la conformazione della linea di riva è molto simile alla precedente. L'area di fondali più profondi presente davanti a Grado Pineta, che nelle carte più vecchie veniva indicata con la dicitura Porto Primero, si mostra piuttosto ridotta anche se sono indicate ancora quote batimetriche pari a 2 m e fondale fangoso.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): la linea di riva appare arretrata rispetto alla carta precedente e si trova in posizione simile a quella attuale.

Banco della Mula di Muggia: in questa carta il banco (indicato con il termine tedesco *Bank Mula di Muggia)* appare spostato verso terra rispetto alla cartografia precedente (Figura 3.9); la parte apicale meridionale appare decisamente migrata verso ovest, mentre l'apice occidentale ha subito un forte arretramento verso est e una contemporanea migrazione verso terra. Nonostante la migrazione il banco sembra essersi

mantenuto in estensione in questo lasso di tempo: la porzione di banco confrontabile nelle due annate passa infatti da 372 ha nel 1822 a 388 ha nel 1974.

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): in tutto questo tratto la linea di riva appare arretrata rispetto al 1822 (Figura 3.10). In corrispondenza del canale di Golametto appare una baia piuttosto ampia. Tutto questo tratto mostra un arretramento della linea di riva, associato però all'estesa presenza di bassi fondali che coprono una fascia con ampiezza compresa tra 570 m all'altezza dell'Averto e 1400 m circa presso il Caneo, che costituisce il lobo destro della foce di Sdoba. Quest'ultima si presenta rivolta verso sud ovest.

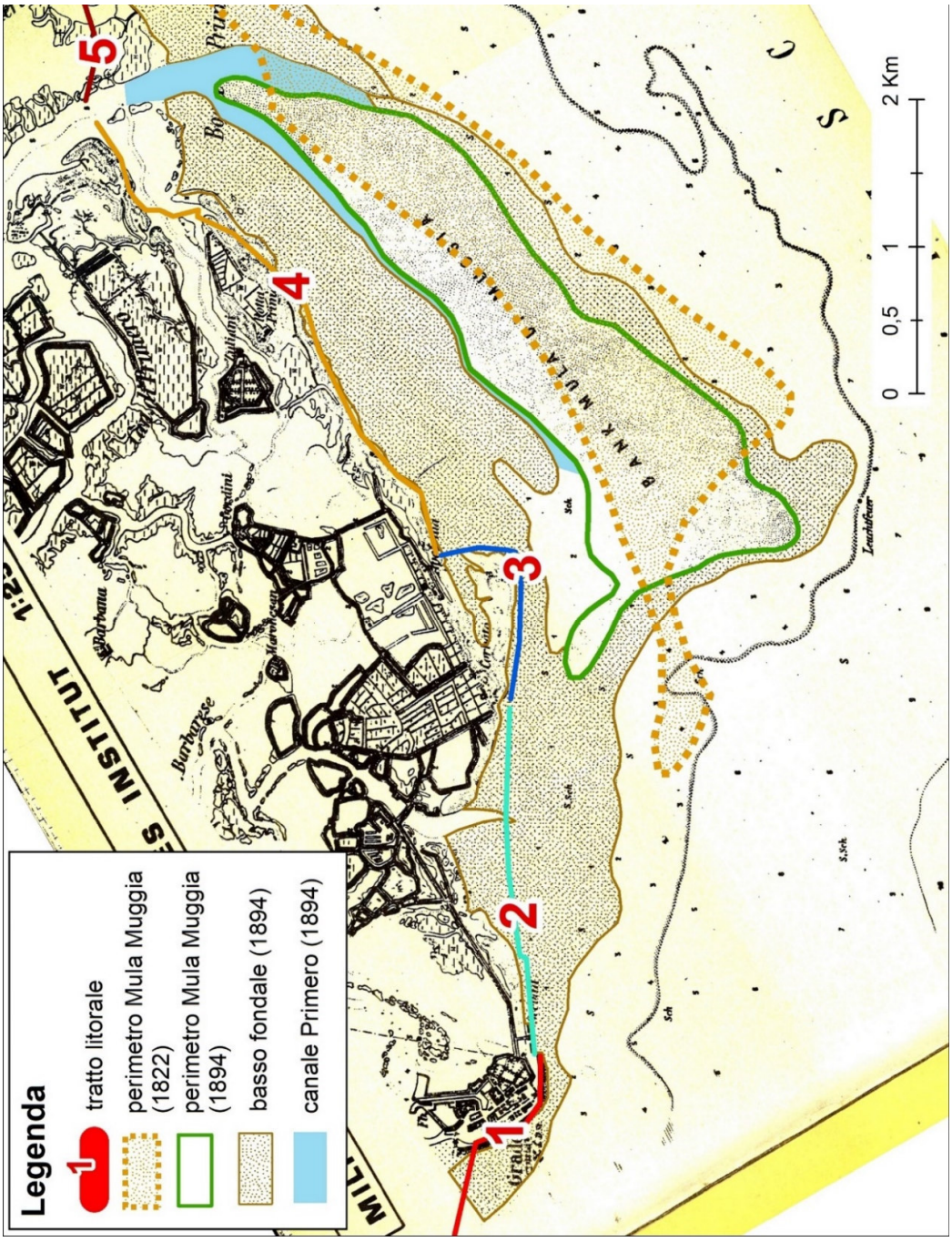
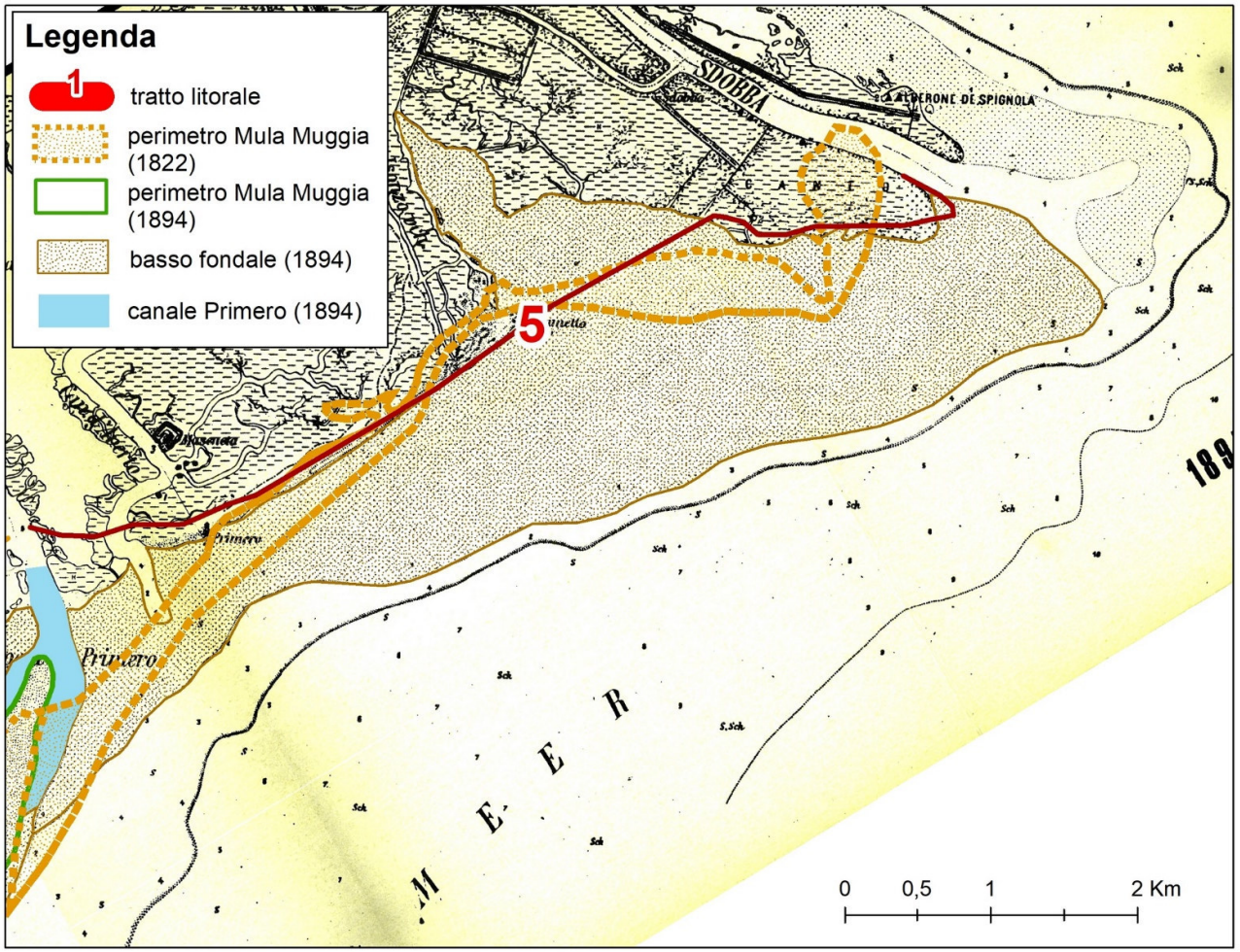


Figura 3.9 – Stralcio della carta topografica del Militargeographisches Institut (1894) con evidenziato il perimetro del Banco e quello ottenuto dalla carta del 1822;è inoltre sovrimposta la linea di riva attuale suddivisa in tratti costieri.

Figura 3.10 - Stralcio della carta topografica del Militargeographisches Institut (1894) con evidenziato il perimetro del Banco e quello ottenuto dalla carta del 1822; è inoltre sovrimposta la linea di riva attuale suddivisa in tratti costieri.



3.1.7. 1915-1917 Carta IGM (40IISE e 40IIISO)

Come già indicato al paragrafo 2.2 queste due carte (Figura 3.11, Figura 3.12) riprendono sostanzialmente in maniera immutata la carta precedente (1894). Si segnalano di seguito le sole modificazioni riscontrate.

Grado (tratto 1): è visibile un pennello all'estremità orientale del murazzo. Secondo quanto riportato da Marocco (2000) nel 1906/1908 l'Amministrazione comunale fece costruire due moli in pietra alle due estremità del murazzo; nel 1910, dopo una disastrosa mareggiata, furono inoltre costruiti due pennelli di pali a difesa della porzione occidentale dell'arenile adiacente al murazzo.

Grado spiaggia (tratto 2): è presente un'estensione verso est dell'abitato originario di Grado con una stradina che accede alla spiaggia (dove è presente la dicitura *Stabilimenti Bagni*). Davanti allo sbocco sbarrato del Canale dei Moreri e nella parte orientale del tratto davanti alla spiaggia sono disegnati alcuni banchi sabbiosi emersi allungati parallelamente alla linea di riva.

I fondali vengono rappresentati solo attraverso la batimetrica -2 m e quella dei -5m, esse appaiono coincidenti alle precedenti per la porzione orientale del litorale (carta 40IIISO).

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): il canale alla foce della Sdobba appare di piccole dimensioni in accordo con la sempre maggior importanza assunta dalla foce della Quarantia evidente nella tavoletta IGM posta immediatamente a nord (Figura 3.13) e con quanto riportato da Desio (1922), secondo il quale *nel 1918 il canale (della Quarantia) conduceva in mare tutte le acque dell'Isonzo che solo durante le piene si riversavano anche nel ramo di Sdobba.*

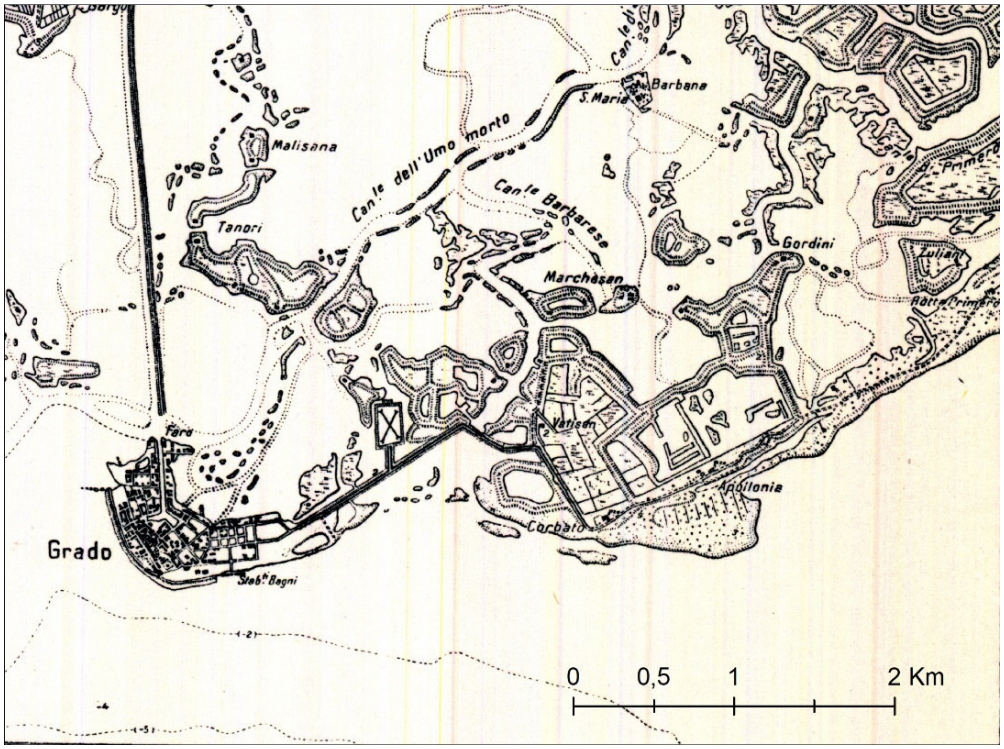


Figura 3.11 - Stralcio della Carta IGM del 1915 (40IISE Grado) con parziali aggiornamenti al 1917.

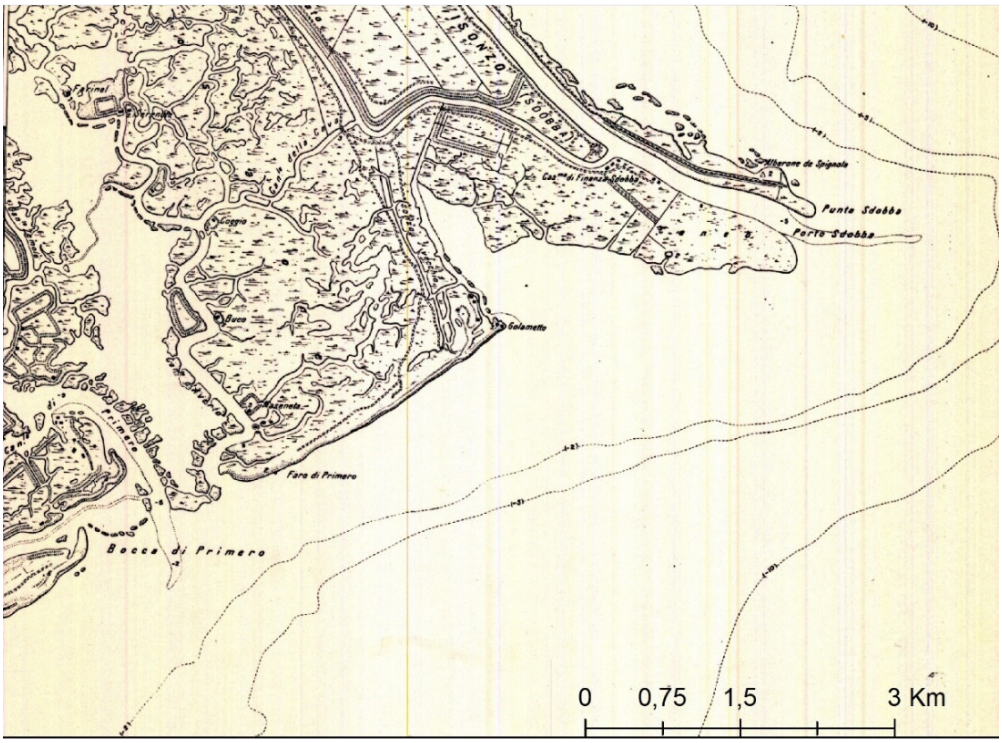


Figura 3.12 - Stralcio della Carta IGM del 1915 (40IIISO Punta Sdobba).

Figura 3.13 - Stralcio della Carta IGM del 1917 (40IIINO Monfalcone) dove è ben visibile il ramo della Quarantia.

3.1.8. 1927 Carta IGM (40IISE1927) e carta I.I.M. (Marina di Grado)

Queste due carte edite nello steso anno hanno stili e precisioni del rilievo molto diverse legate soprattutto agli scopi diversi cui erano destinate (Figura 3.14, Figura 3.15). L'estrema differenza nella modalità di rappresentare l'entroterra le rende inoltre difficilmente confrontabili l'una con l'altra con adeguata precisione. La prima ha come base il rilievo austriaco del 1896 / 97aggiornato al 1927 solo per quel che riguarda la parte a terra, la parte a mare non riporta le batimetriche ma solo il perimetro del banco della Mula di Muggia che è lo stesso della carta austriaca.

Si descrivono di seguito le principali evidenze riscontrate nelle due carte:

Grado (tratto 1): sono evidenti ampliamenti del centro abitato di Grado con imbonimenti e nuove urbanizzazioni a ovest e a est del canale del mandracchio. In corrispondenza dell'estremità orientale della diga che protegge l'abitato di Grado è presente il già citato pennello costruito nel 1906-08. I fondali antistanti risultano in erosione con un arretramento della batimetrica -2 m (corrispondente alla -2.5 sul livello medio mare).

Grado spiaggia (tratto 2): sono rappresentati gli interventi iniziati nel 1912-13 (Marocco, 2000; Studio Volta) e secondo De Grassi & De Grassi (1957) realizzati nel 1926 dall'Amministrazione della *spiaggia volti alla costruzione di una spiaggia artificiale a scopo balneare che collegasse Grado con Punta Barbacale, segregando alle spalle della spiaggia un'area paludosa*. Sono presenti una strada, protetta verso mare da un muro e 7 pennelli, a partire dalla diga di Grado in direzione est. La struttura si interrompe prima di Grado Pineta. Nella carta I.I.M. i fondali antistanti mostrano arretramenti della batimetrica -2.5 m per la parte più occidentale (fino al secondo pennello circa), è inoltre indicata la presenza di fango misto a sabbia sottoriva.

Grado Pineta (tratto 3): il promontorio di Grado Pineta appare rappresentato con maggior dettaglio rispetto alle cartografie precedenti, sono visibili cordoni di dune alle spalle della spiaggia ed è rappresentato un argine sul lato orientale a chiusura della zona di bonifica già visibile nella carta precedente. La spiaggia è più ampia e davanti alla linea di riva sono rappresentati alcuni banchi sabbiosi di forma allungata.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): questo tratto non è completo mancando la tavoletta Punta Sdobba. Le aree alle spalle della spiaggia mostrano interventi di parziale bonifica con estese arginature sul lato rivolto alla laguna.

Banco della Mula di Muggia: il perimetro del banco della Mula di Muggia nell'IGM è lo stesso della carta austriaca del 1894. La carta I.I.M. invece riporta un rilievo diverso. Sono riportate una serie di quote batimetriche, la batimetrica 0 (corrispondente a -0.52 m al di sotto del livello medio del mare), la batimetrica -1 (corrispondente a -1.52 m), la batimetrica -2 m, -4 m e -9 m. Confrontato con il rilievo precedente la porzione semi-emersa dl banco appare aver subito una parziale traslazione verso terra con erosione del suo apice meridionale e un contemporaneo allungamento verso ovest dove presenta un apice uncinato rivolto verso l'entroterra. Esso però è posto in una posizione più verso mare rispetto al precedente. Tra il banco e la linea di riva non è indicata alcuna morfologia né alcun dato batimetrico.

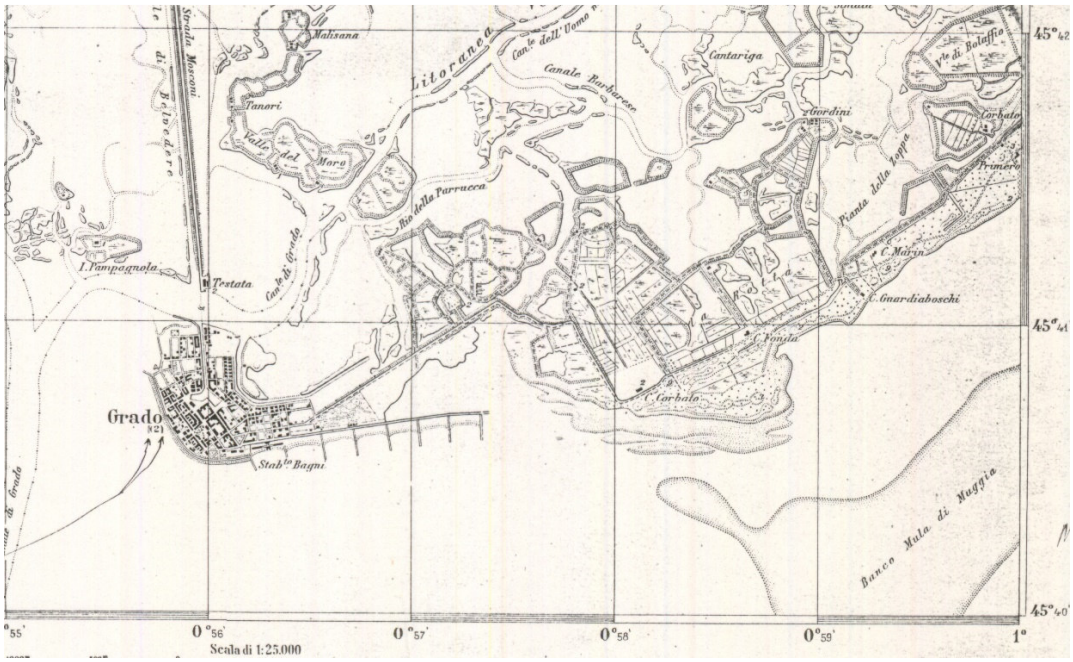


Figura 3.14 – Stralcio1927 della Carta IGM (40IISE1927)

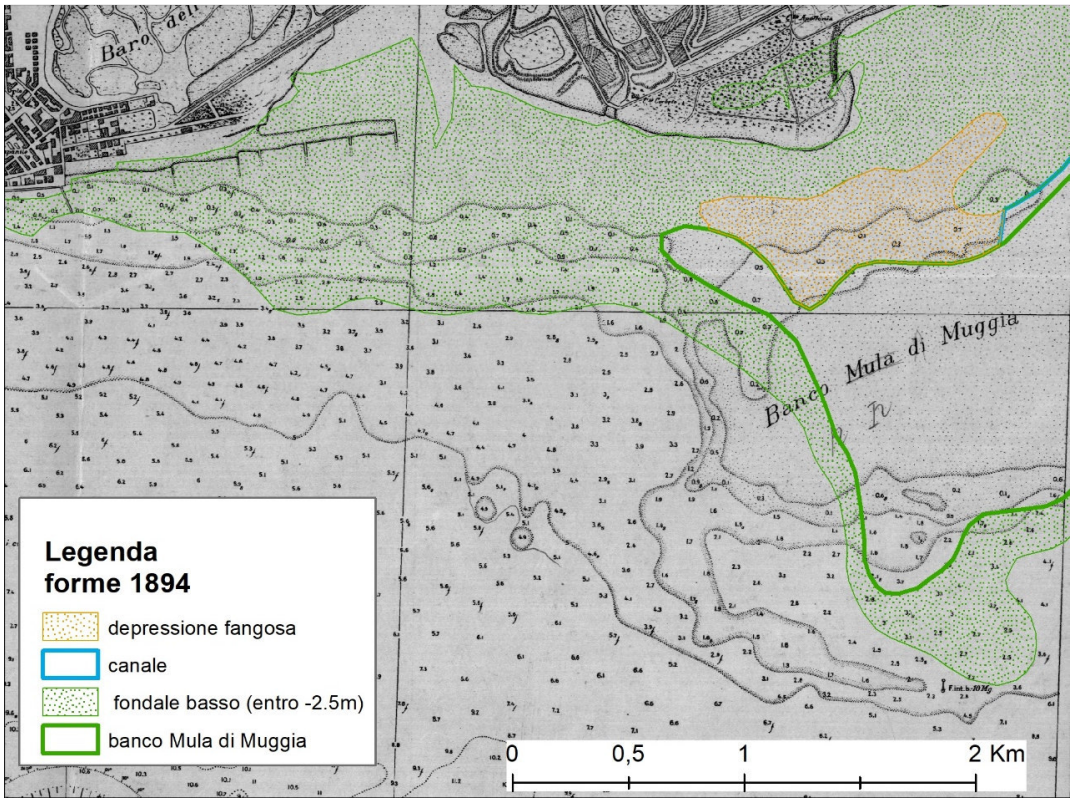


Figura 3.15 – Stralcio della carta I.I.M. (Marina di Grado) del 1927 con sovraimposti alcuni elementi tratti dalla cartografia del 1894.

3.1.9. 1938/39 Carta IGM (40IISE1938 e 40IIISO1938)) e carta I.I.M (Marina di Grado 1939)

Grado (tratto 1): sono presenti i due moli guardiani della bocca di porto di Grado: il lungo molo a ovest che fiancheggia il canale di S. Pietro d'Orio e quello a est che si diparte dall'abitato di Grado con forma uncinata (Figura 3.16). Questa opera per una lunghezza di circa 1200 m e di altezza di circa 2.6 m venne eseguita dal Magistrato alle Acque di Venezia tra il 1927-28 e il 1934. Alcune modifiche e piccoli ampliamenti sono presenti nella parte nord del centro storico ed è inoltre presente il ponte di collegamento tra l'abitato e il terrapieno Grado – Belvedere.

Grado spiaggia (tratto 2): il tratto appare immutato fatta eccezione di un ulteriore ampliamento verso est dell'abitato di Grado alle spalle dell'opera di difesa della spiaggia e dell'arginatura di una porzione di basso fondale alle spalle della spiaggia nella parte orientale del tratto.

Grado Pineta (tratto 3): non ci sono variazioni significative, i banchi sabbiosi di forma allungata davanti alla linea di riva non sono più rappresentati.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): questo tratto presenta cambiamenti sostanziali che comprendono la quasi totale arginatura / bonifica dell'entroterra, lo sbarramento dell'Ara della Rotta il cui argine si prolunga per un buon tratto lungo riva e appare corredato da una prima serie di piccoli pennelli.

Banco della Mula di Muggia: in questa carta (Figura 3.16) il banco sembrerebbe aver subito una traslazione verso terra con un arretramento di quasi 900 m dovuto all'erosione del suo apice meridionale e un contemporaneo allungamento verso est dell'apice uncinato rivolto verso l'entroterra. La sua estensione complessiva risulta pari a circa 330ha. È probabile che una modificazione così importante sia in parte da attribuire a un diverso criterio di interpretazione cartografica della struttura ossia che sia stata cartografata solo la parte più emersa del banco.

Per lo stesso motivo appare di difficile interpretazione anche l'evoluzione delle tre linee indicanti il limite del Banco presentate in Figura 3.16. Da un lato apparirebbe coerente l'arretramento progressivo (anche se eccessivamente rilevante) dell'apice meridionale del banco e la sua rettificazione; più difficile invece risulta interpretare l'evoluzione di segno diverso nel tempo dell'apice occidentale. Essa potrebbe essere spiegata, ammesso che i relativi rilievi non siano affetti da errori grossolani, da fasi evolutive intervenute negli intervalli di tempo non documentati (soprattutto in quello molto lungo tra il 1894 e il 1927); in questo periodo l'apice originario del banco avrebbe potuto venir interessato da un evento di rotta. A livello di ipotesi potrebbero anche essere stati realizzati interventi di escavo artificiali per mantenere una minima navigabilità dell'originario Porto Primero e / o per l'approvvigionamento di sabbie per le prime fasi di costruzione della spiaggia artificiale.

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): è rappresentata la completa bonifica del territorio alle spalle della spiaggia (Bonifica della Vittoria), con totale eliminazione dei canali originari, costruzione di canali di bonifica, arginatura e rettificazione della linea di costa compreso il tratto di Golameto (Figura 3.17). É evidente lo sbarramento del canale d'Averto (avvenuta nel 1935 secondo Studio Volta) e l'arginatura di una peschiera alla destra del suo ultimo tratto. Da segnalare inoltre la costruzione sulla linea di riva di una prima serie di 4 pennelli in prossimità dello sbarramento dell'Averto e la presenza di una piccola spiaggia presso Golameto con davanti un banco sabbioso di forma allungata (Figura 3.17). Di rilevante importanza in questo periodo è anche lo sbarramento del canale della Quarantia che riporta la foce principale dell'Isonzo a Sdobba. Esso è ben visibile nella relativa tavoletta IGM (Figura 3.18) e viene nel contempo citato da De Grassi & De Grassi (1957).

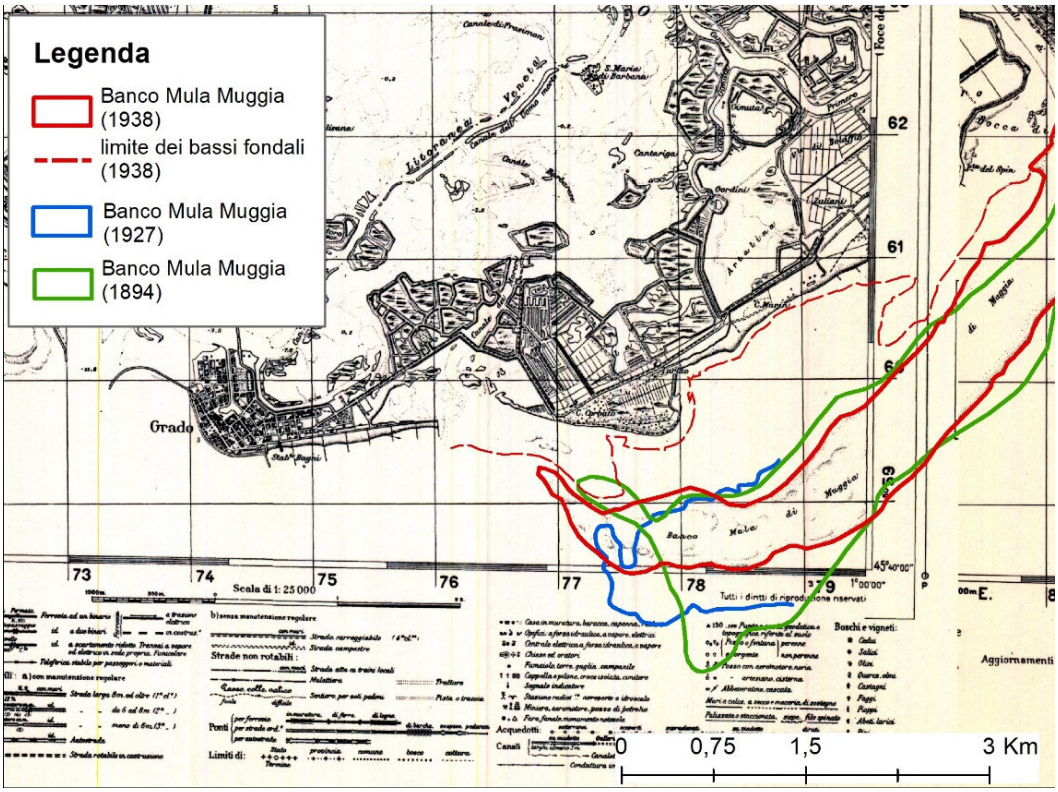


Figura 3.16 - Stralcio della carta I.G.M. del 1938 (40IISE1938) con sovraimposti alcuni elementi tratti dalla cartografia del 1894 e del 1927.

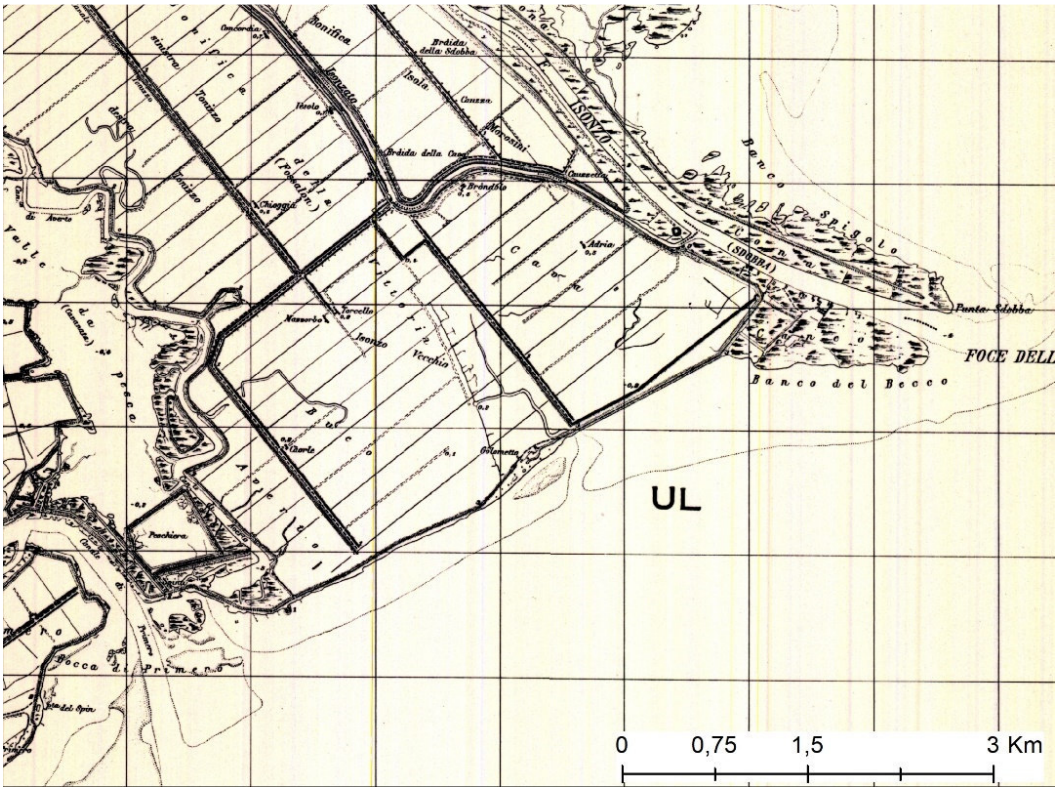


Figura 3.17 - Stralcio della carta I.G.M. (40IIISO1938).

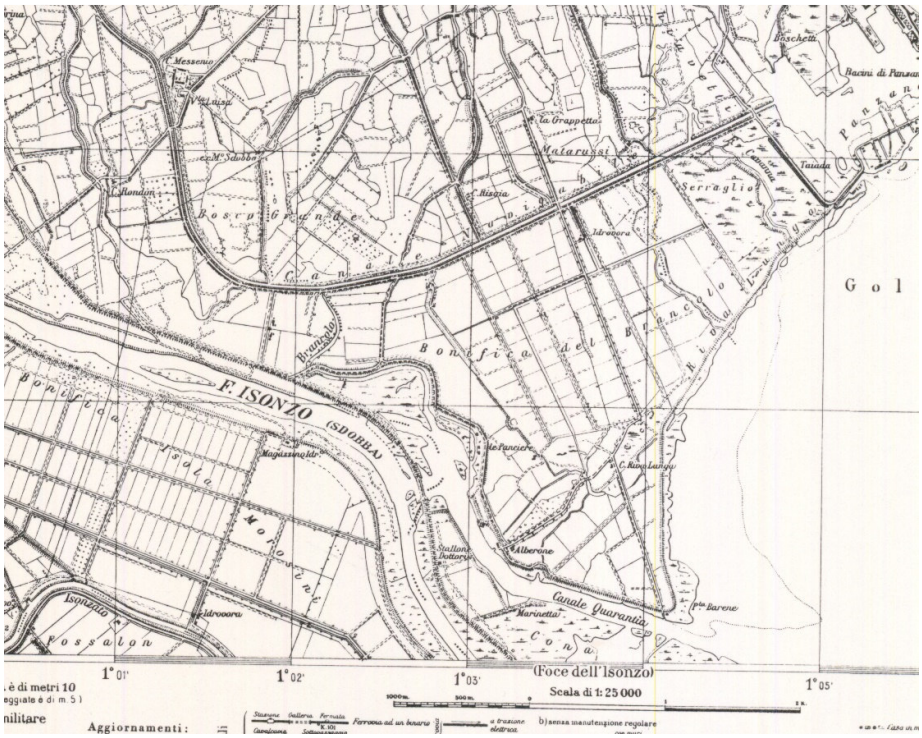


Figura 3.18 – Particolare della carta I.G.M. 40IIISO1938 per la zona Isonzo – Quarantia: è visibile lo sbarramento artificiale di quest'ultima.

3.1.10. 1949 Carta IGM (40IISE1949 e 40IIISO 1949)

Grado (tratto 1): è visibile il prolungamento del molo di sinistra della bocca di Grado verso l'interno laguna con sviluppo di una nuova area urbanizzata alle sue spalle e il primo abbozzo della spiaggia Costa Azzurra (Figura 3.19).

Grado spiaggia (tratto 2): completamento delle opere (argine e pennelli) presenti nella carta precedente a opera del Governo Militare Alleato con formazione di una spiaggia artificiale creata attraverso rifluimenti di sabbia dai fondali antistanti in quantità di circa 90000 mc (De Grassi & De Grassi, 1957; Marocco, 2000). Alle spalle della nuova spiaggia è visibile un'area paludosa (*La Sacca*).

Grado Pineta (tratto 3): ulteriore ampliamento dell'area bonificata in zona *La Rotta*. Viene indicato per la prima volta il toponimo *Punta di Barbacale*.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): nessuna variazione.

Banco della Mula di Muggia: nessuna variazione in quanto il perimetro del banco è quello del 1938.

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): nessuna variazione in quanto per questo tratto il rilievo è quello del 1938.

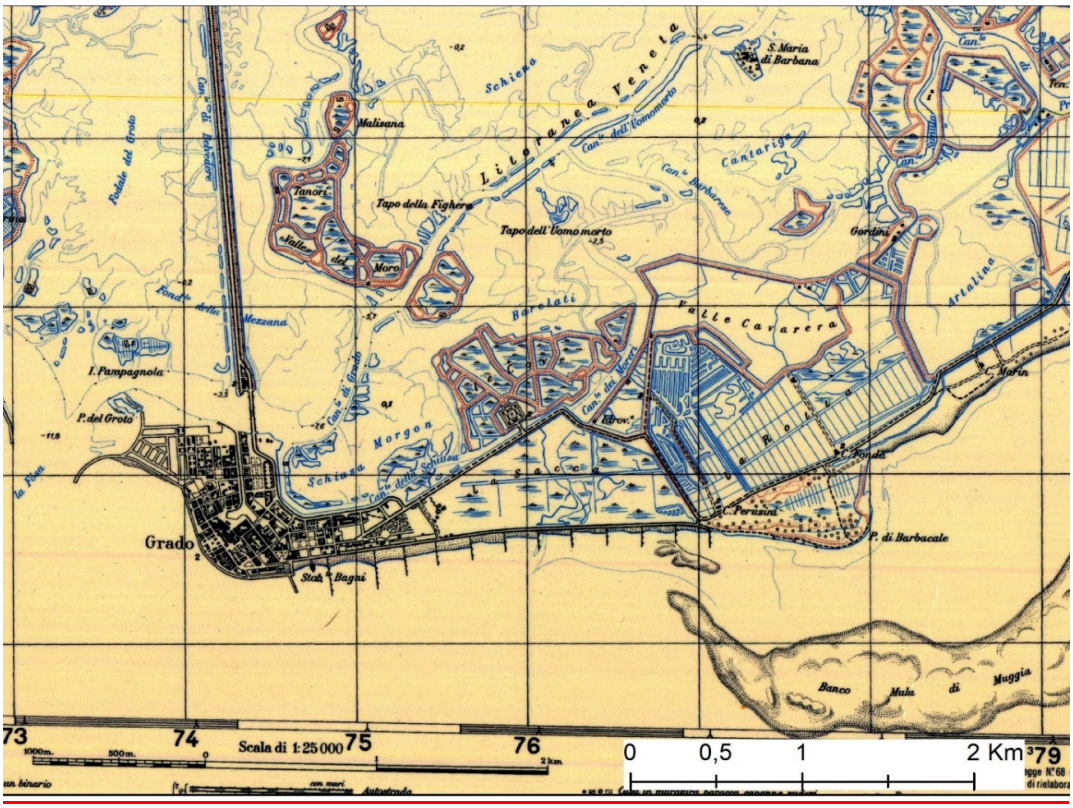


Figura 3.19 - Stralcio della carta I.G.M. 40IISE del 1949.

3.2. **Evoluzione morfologica periodo 1954 – 2014**

A partire dagli anni '50 la possibilità di interpretazione dell'assetto morfologico e dinamico dell'area si amplia grazie alla disponibilità di foto aeree e nel contempo di campagne di rilievo topo-batimetrico realizzate a scopo scientifico e/o conoscitivo, descritte al paragrafo 1.3.

L'insieme dei dati a disposizione ci ha premesso di evidenziare le morfologie presenti e la loro evoluzione nel tempo, di identificare le principali modifiche territoriali e di contribuire all'analisi dell'evoluzione della linea di riva e dei fondali, quantificata nel capitolo 4, grazie alle metodologie di confronto dei rilievi topo - batimetrici.

Le morfologie e le strutture sedimentarie presenti permettono di classificare il sistema costiero come un *sistema di isola barriera* distaccato dalla terraferma (Figura 3.20), la sua particolarità in questo caso è data dal non essere un sistema emerso, come di sovente accade, bensì collocato in prevalenza alle quote intertidali.

Possono essere individuati differenti sistemi morfo-sedimentari ciascuno dominato dall'interazione di diverse forzanti:

- sistema *barrier* (barriera): caratterizzato dall'azione del moto ondoso, da sedimenti prevalentemente sabbiosi e da presenza più o meno consistente di barre e truogoli. Nello specifico, essendo un sistema prevalentemente intertidale, si colloca nella parte della spiaggia sottomarina superiore, cioè quella soggetta all'azione attiva di modellamento delle onde. La spiaggia sottomarina (*shoreface*) si divide propriamente in due porzioni: la prima corrisponde alla parte dinamica vera e propria, detta *upper shoreface* (cioè spiaggia sottomarina superiore, come già detto), che è limitata verso mare dalla profondità di chiusura a cui corrisponde, in genere il piede della barra sottomarina più esterna e il limite di estensione del prisma di sabbie sottocostiere; la seconda, detta *lower shoreface* (spiaggia sottomarina inferiore) di estende dalla profondità di chiusura fino alla cosiddetta base d'onda (pari alla semilunghezza d'onda): si tratta di un fondale soggetto al modellamento di forzanti a lungo periodo e può essere considerata solo parzialmente attiva. Nei fondali nord-adriatici, in particolare quelli in esame, l'upper shoreface può essere fatta coincidere con la batimetrica -4/5 m, laddove la base d'onda raggiunge maggiori profondità, di norma oltre al doppio del valore della profondità di chiusura.

- sistema *backbarrier* (retro-barriera o retro-banco): dominato dalle correnti di marea e caratterizzato da bassi fondali racchiusi tra la linea di riva e i banchi o isole barriera, da sedimenti anche fangosi, da coperture di fanerogame o "mat algali" e da un sistema di canalizzazione delle correnti di marea più o meno sviluppato.

- sistema del *delta di riflusso (ebb-tidal delta)*: risultato dell'interazione moto ondoso – correnti di marea in corrispondenza di una bocca lagunare. È costituito in primo luogo da un canale principale e da una struttura sedimentaria di accumulo a forma di mezzaluna che si estroflette più o meno verso il largo.

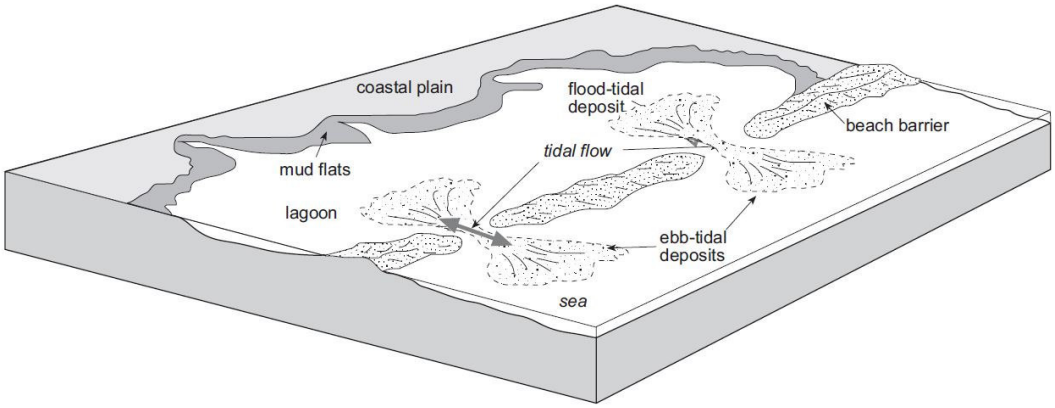


Figura 3.20 - Elementi morfologici tipici di un sistema laguna – isola barriera influenzato dalle onde e dalle correnti di marea (Nichols, 2009): barena (salt marsh), piana tidale o velma (tidal flat), spiaggia (beach), isola barriera (barrier island), bocca tidale (tidal inlet), canale principale (main channel), canale secondario (secondary channel), delta di flusso (flood delta), delta di riflusso (ebb delta).

Si riporta di seguito una serie di raffronti per diversi momenti temporali, basati come detto sulla disponibilità di foto aree e dati topo-batimetrici descritti ai paragrafi 2.3 e 2.4.

3.2.1. 1954

Le foto aeree del 1954 (volo GAI) sono in bianco e nero, molto nitide e ben contrastate (Figura 3.21; Figura 3.22, Tavola 7). La descrizione del litorale ottenuta grazie a questa levata è supportata dalla descrizione fornita De Grassi & De Grassi (1957), che riportano anche una mappa del sistema del Banco della Mula di Muggia con i principali elementi morfologici, corredati da un'ipotesi di intervento per il recupero del litorale (Figura 3.23).

Gli elementi mappati grazie alla foto – interpretazione e con il supporto dei dati sopra esposti sono presentati nella Tavola 1 dell'Allegato limitatamente ai tratti di litorali compresi tra Grado e la bocca di Primero. Di seguito vengono invece descritte le caratteristiche salienti dei litorali, anche in confronto alla situazione del 1938.

Grado (tratto 1): la spiaggia Costa Azzurra è appena accennata con dimensioni molto simili a quelle rappresentate nella cartografia IGM 1949.

Grado spiaggia (tratto 2): sul lato laguna è visibile una prima arginatura di quella che diventerà l'Isola della Schiusa. L'area della Sacca appare da poco bonificata. La linea di riva presenta debolissime falcature tra i pennelli che non danno indizi sulla direzione del trasporto prevalente longshore. I fondali antistanti mostrano numerose barre intertidali ad andamento approssimativamente parallelo alla linea di riva alternate a depressioni. L'insieme forma una fascia di basso fondale davanti alla spiaggia che appare di ampiezza ridotta (circa 150 m davanti nella parte più occidentale ma aumenta man mano che si procede verso est e all'altezza dell'ultimo pennello arriva a 290 m). Le morfologie sono a tratti caotiche e assumono l'aspetto di un ambiente protetto probabilmente dovuto anche all'utilizzo di sedimenti non del tutto idonei per la costruzione della spiaggia artificiale.

Grado Pineta (tratto 3): il promontorio di Grado Pineta appare vegetato con una prima stradina in direzione est - ovest. La spiaggia è sottile e sono presenti dei piccoli pennelli; un pennello è presente anche ad est di Punta Barbacale dove la spiaggia presenta falcature molto pronunciate e si interrompe in corrispondenza dello sbocco a mare del canale di scolo della piccola area di bonifica.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): non si evidenziano modificazioni degne di nota.

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): mancando le foto aeree del 1954 per questo tratto facciamo riferimento alla carta IGM del 1959. L'assetto territoriale rimane immutato. Uniche modifiche evidenti: la costruzione di una serie di pennelli lungo tutto il litorale tra Primero e Golameto spaziati di 110 m circa l'uno dall'altro; la sparizione di un piccolo banco sabbioso davanti a Golameto e un parziale arretramento dell'apice del banco del Becco in destra della foce dell'Isonzo.

De Grassi & De Grassi (1957) riportano la pratica in voga da molti anni di asportare grandi quantità di sabbia sui banchi subacquei nella zona di Golameto da parte di *grandi barche da trasporto*.

Banco della Mula di Muggia: il sistema del Banco, costituito da un'ampia area di barre sabbiose unite a formare un ampio triangolo, è ben identificabile nella foto, anche se purtroppo le morfologie dell'apice meridionale non sono ben visibili a causa di un esteso riflesso sulla foto. Alle spalle dell'area sabbiosa è presente l'estesa area a carattere paralagunare che appare caratterizzata da una copertura di fanerogame, nonostante la quale si individuano ancora alcuni lineamenti riconducibili all'assetto morfologico antico. In particolare è ancora visibile la struttura dell'antico canale di Primero alle spalle dell'attuale area di banco attivo.

Lungo il bordo del Banco sono individuabili più linee di frangenza delle onde lungo tutto il limite orientale e meridionale; in corrispondenza della più esterna si è fatto coincidere il limite esterno del banco. Nello stesso tempo non essendo disponibili dati batimetrici è difficile tracciare delle linee batimetriche interne al banco stesso direttamente confrontabili con la sua mappatura pregressa.

Sul lato occidentale è ben visibile un esteso banco sabbioso di poco emergente la cui estremità appare traslata di circa 230 m verso ovest rispetto alla posizione dell'apice occidentale del banco nel 1938.

Il limite orientale del Banco appare traslato verso terra in maniera significativa, nello stesso tempo vi è una traslazione verso terra del canale di Primero che tende a disporsi con andamento parallelo alla linea di riva. La traslazione appare massima in corrispondenza del limite orientale (pari a 400 m circa) e diviene nulla 2 km dopo verso ovest.

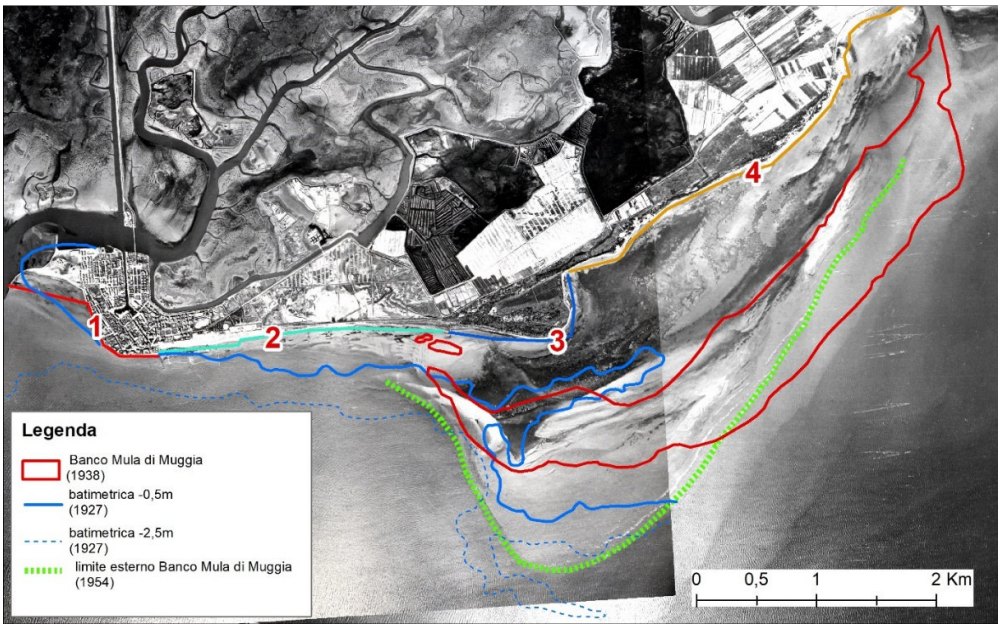


Figura 3.21 - Stralcio della foto aerea del 1954 (volo GAI) con sovraimposti alcuni elementi tratti dalla cartografia del 1938 e del 1927.

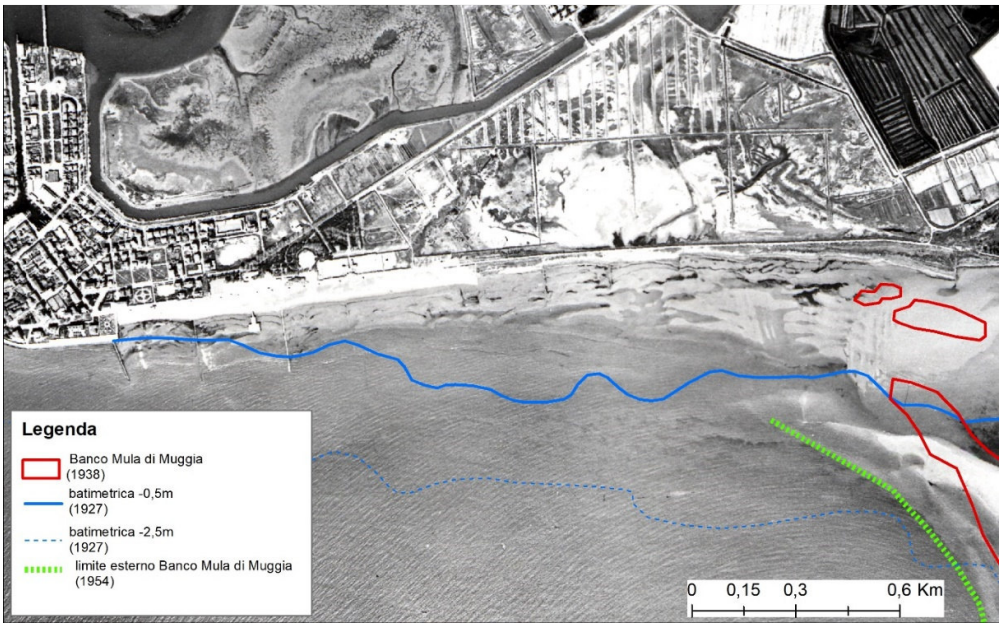


Figura 3.22 - Stralcio della foto aerea del 1954 (volo GAI) per il tratto di Grado Spiaggia con sovraimposti alcuni elementi tratti dalla cartografia del 1938 e del 1927.

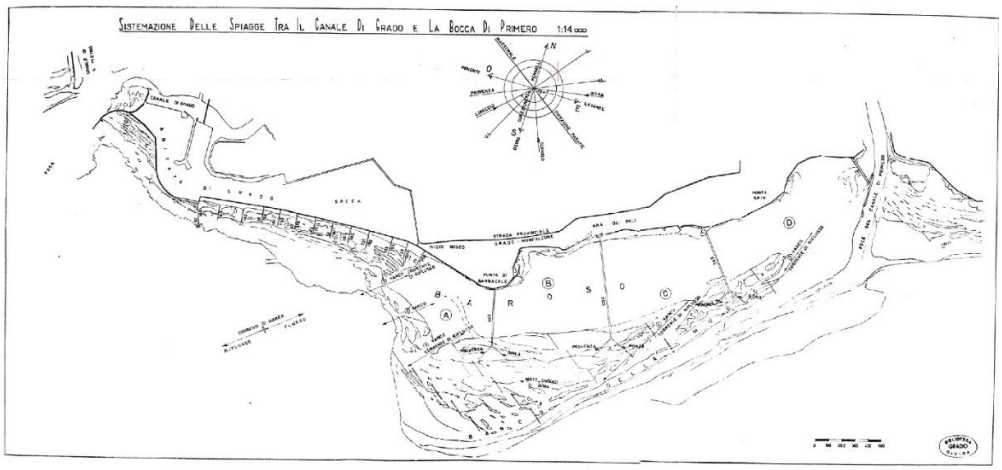


Figura 3.23 – Mappa del litorale da Grado a Primero di De Grassi & De Grassi (1957), sono disegnati gli elementi morfologici principali dei fondali davanti alla spiaggia e del sistema del banco, corredati da un'ipotesi di intervento per la riqualificazione del litorale.

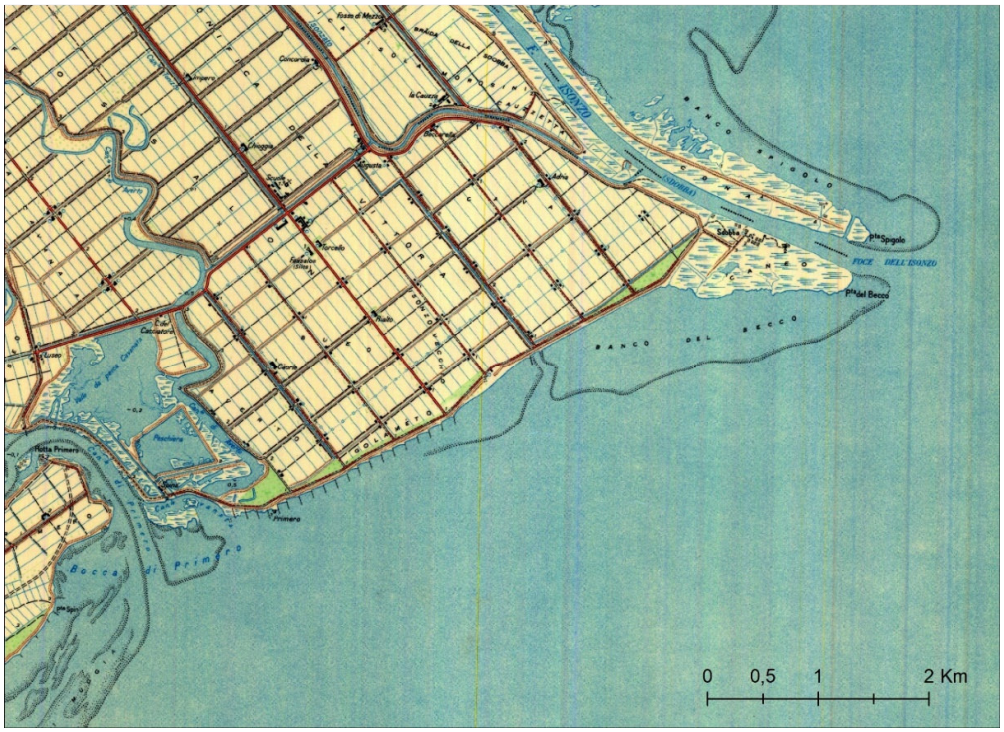


Figura 3.24 - Stralcio della carta I.G.M. (40IIISO) del 1959.

3.2.2. 1978

Per la descrizione del litorale all'anno 1978 abbiamo utilizzato:

- Foto aree CNR 1978, presentate nella Tavola 7.
- Carte di dettaglio dello *Studio Volta* in particolare la carta N°4, 5 e 6 (allegati A6, A7 A8) in scala 1:10000; esse contengono come base la cartografia aerofotogrammetrica ufficiale in scala 1:5000 della regione FVG sulla quale (secondo quanto riportato in legenda) sono disegnate la linea di riva del 14/07/1974, la linea di riva rilevata dallo Studio (4 -14 /07/1978), i punti quotati relativi alle sezioni di spiaggia rilevate nello stesso periodo e alcune batimetriche ricavate da precedenti rilievi dell'Istituto Idrografico della Marina in base a rilievi 1959.
- Informazioni sulla ricognizione di dettaglio compiuta nell'ambito dello stesso Studio Volta (luglio 1978-1979).
- Quote batimetriche dei rilievi del 1968.

La cartografia dello Studio Volta appare però affetta da alcune problematiche / imprecisioni che ne compromettono almeno in parte l'utilizzo e l'affidabilità:

- La spaziatura estremamente elevata tra i profili batimetrici (maggiore di 2 km) e la loro ubicazione sono poco adatte al rilievo delle morfologie più interessanti dell'area, prima fra tutte il Banco della Mula di Muggia.
- L'elevata spaziatura tra i punti dei profili batimetrici (circa 150m).
- L'incongruenza delle linee batimetriche con i punti batimetrici su sezione, le batimetriche riportate sono infatti ricavate da precedenti rilievi dell'Istituto Idrografico della Marina in base a rilievi 1959.
- La non leggibilità delle due linee di riva dichiarate in legenda.

Utilizzando le carte storiche a disposizione e i grafici dell'I.I.M., Studio Volta ha anche analizzato l'andamento dei fondali in corrispondenza delle sezioni di 3 dei profili batimetrici realizzati in occasione dello Studio stesso. Si tratta dei profili 17 (denominato Grado Pineta), 18 (Mula di Muggia), e 23 (Punta Sdobba). Analizzando i grafici nel dettaglio e confrontandoli con l'analisi cartografica da noi realizzata sono emerse però notevoli imprecisioni nel confronto realizzato.

Tutti gli elementi mappati grazie alla foto – interpretazione e con il supporto dei dati sopra esposti sono presentati nella Tavola 2 dell'Allegato.

Grado (tratto 1): la spiaggia Costa Azzurra è ampia e stabile con una lunghezza di 650 m e un 'estensione complessiva pari a 7.5 ha (in base alla linea del rilievo del 1978); essa è soggetta a interventi manutentori annuali con pulizie, spianamenti e ampliamenti delle superfici di spiaggia.

Grado spiaggia (tratto 2): sul lato laguna è visibile la completa bonifica e urbanizzazione dell'isola della Schiusa, alle spalle della spiaggia è presente un'estensione dell'area urbanizzata nelle aree di più recente bonifica. La spiaggia appare indicata come *Spiaggia in concessione all'Azienda Autonoma di Soggiorno di Grado.* La linea di riva forma deboli falcature tra i pennelli che per i pennelli più occidentali mostrano maggior accumulo di sedimento sul lato orientale delle celle; forniscono quindi indicazione di un trasporto sedimentario diretto almeno in parte da ovest verso est (Figura 3.25). I fondali antistanti la spiaggia sono costituiti da molteplici barre alternate a brevi depressioni che si susseguono in una fascia a basso fondale; essa appare di ampiezza minima a ovest ma si amplia notevolmente fino a raggiungere un'ampiezza di 550 m poco prima del pennello più orientale. Il profilo batimetrico realizzato da Studio Volta in questa zona riporta per questa fascia quote comprese entro i -0.40 m.

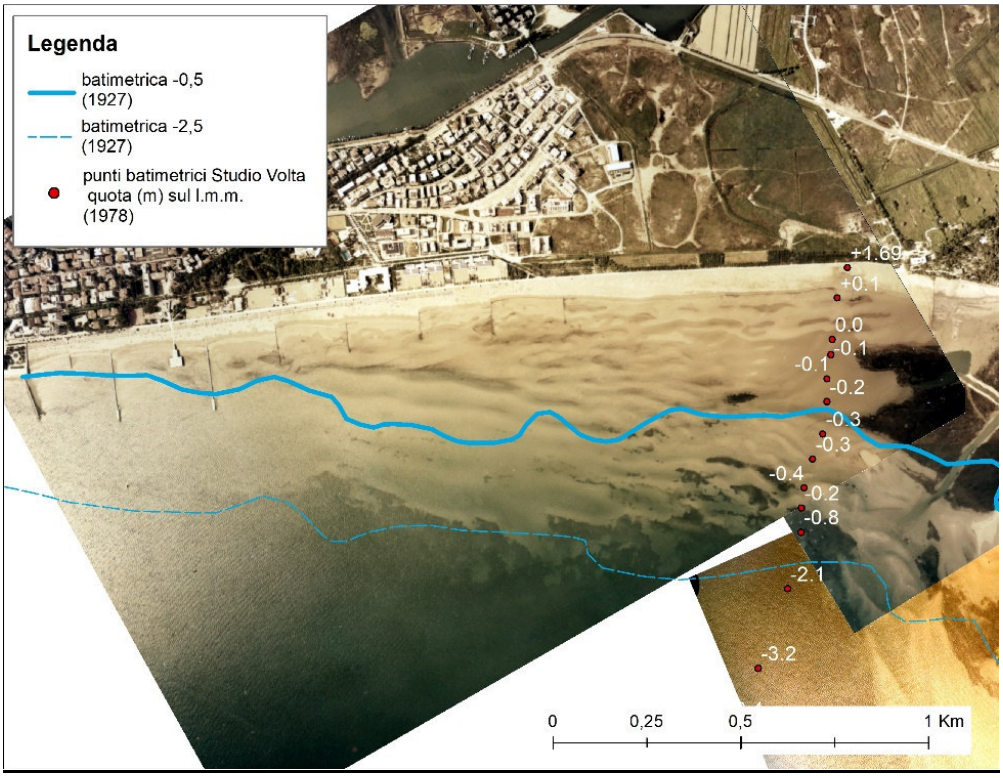


Figura 3.25 – Stralcio della foto aerea del 1978 per il tratto 2 (spiaggia di Grado) con sovrimposti alcuni elementi delle batimetrie coeve e del 1927

Grado Pineta (tratto 3): dopo l'ultimo pennello che chiude il tratto 2, lo spazio alle spalle della spiaggia è stato occupato da un campeggio. Altri elementi di rilievo sono: costruzione del centro turistico di Grado Pineta con completa urbanizzazione delle aree verdi naturali e dell'area precedentemente bonificata; costruzione di una modesta spiaggia artificiale attraverso rifluimento di sabbia (fonte *Studio Volta*); protrusione in mare di Punta Barbacale con costruzione di un pennello in scogliera (1968-69, fonte *Studio Volta*), escavo di una "piscina" davanti alla spiaggia di Grado Pineta e di un canale artificiale che "taglia" le barre occidentali del Banco della Mula di Muggia per consentire l'uscita in mare di piccoli natanti. Lo specchio acqueo compreso tra la linea di riva e il Banco delle Mula di Muggia assume un aspetto tipico di un ambiente di retrobarriera con estese praterie a fanerogame e piane tidali con "microbial mats". Subito ad est del pennello di Punta Barbacale il carattere di retrobanco è testimoniato anche dalla presenza di un piccolo canale ad andamento meandreggiante che drena i bassi fondali.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): la spiaggia si presenta molto sottile e bordata verso terra da un argine, l'entroterra della parte orientale è stato interessato dalla costruzione di campeggi che hanno occupato sia le aree agricole che quelle caratterizzate ad aree boscose più vicine al litorale. Davanti alla spiaggia si sviluppa un'area di retrobanco per la quale Studio Volta riporta quote comprese tra -0.1 e -0.7 m con ampiezza di 800 – 900 m. La tenuta Primero, il più orientale dei 3 campeggi, è caratterizzato da una spiaggia più ampia ricostruita artificialmente e limitata a est dal canale di Primero dal quale è divisa da un'opera fissa di stabilizzazione; a circa 200 m dalla bocca è presente un pennello con pontile davanti al quale è stata scavata una "piscina" per agevolare la balneazione. Subito all'interno dell'imbocco del canale di Primero è presente la piccola darsena della Tenuta Primero.

Banco della Mula di Muggia: il sistema del Banco è molto ben visibile nella foto aerea ma purtroppo come già detto, è stato interessato solo in minima parte dai rilievi batimetrici del 1978. Per questo motivo mentre risulta facile individuare le barre attive con la loro morfologia e la forma complessiva del banco con il suo limite verso mare, è più difficile tracciare delle linee batimetriche interne al banco stesso e quindi renderlo direttamente confrontabile con la sua mappatura pregressa più antica (Figura 3.26). Limite esterno e morfologie del Banco sono invece ben confrontabili con la situazione del 1954, trattandosi sempre di foto - interpretazione.

In particolare analizzando la foto aerea del 1978 appare evidente come la parte più esterna del banco sia caratterizzata da barre che costituiscono un sistema dissipativo molto esteso e interessato da continui movimenti di sabbie; soprattutto nella parte apicale meridionale le creste sono piuttosto continue e con una distanza l'una dall'altra di 80/90 m (Figura 3.26). Per chiarire meglio la morfologia della parte esterna del banco e quindi determinare la posizione del suo limite abbiamo utilizzato anche le quote batimetriche dei rilievi del 1968 che, pur non essendo coeve, possono fornire un supporto per comprendere meglio gli aspetti morfologici. In corrispondenza dell'ultima cresta di barra è presente una ripida scarpata verso il largo, il piede della barra può quindi rappresentare in maniera adeguata il limite del Banco verso l'esterno. Analizzando le quote lungo il profilo 4 e 5 (Figura 3.27, Figura 3.28) il piede della barra corrisponde alla quota di -2.7 m. Vista la ripidità del fianco della barra la distanza tra il piede e la cresta è di circa 20 m e l'errore nel confronto con il limite del 1954 (tracciato sulla base della sola foto aerea) può essere ritenuto perciò di questa entità. Viene individuata in questo modo la *upper shoreface*.

Una vola individuato il limite del banco esso può essere messo a confronto con le situazioni del 1954 e del 1927 come visibile in Figura 3.26: ne risulta che il bordo orientale e la parte apicale conservano una posizione grossomodo immutata rispetto al 1954, mentre una vistosa migrazione verso ovest coinvolge la parte occidentale, a conferma della tendenza in atto a lungo termine.

Sul lato orientale, esternamente al limite appena definito sono presenti delle barre con cresta perpendicolare alle altre (*finger bars*) che testimoniano un trasporto di sedimento in posizione un po' più profonda in corrispondenza di una piattaforma / terrazzo individuabile grazie alle quote batimetriche (Figura 3.29).

La parte interna del Banco appare costituta da un insieme di barre alternate e depressioni che risultano progressivamente colonizzate dalle fanerogame man mano che l'area non viene più interessata in maniera continua dal movimento della sabbia (Figura 3.29).

La maggiore estensione della prateria a fanerogame rispetto al 1954 appare evidente Figura 3.30. Essa è accompagnata dal progressivo rinsaldarsi di barre che sono trasgredite su un'area inizialmente depressa. Nello stesso tempo le barre hanno obliterato e rielaborato parte del banco emerso che risultava evidente sul lato occidentale del sistema nel 1954 (Figura 3.29). Prosegue anche la costruzione di una nuova parte di banco sul lato occidentale con evidente formazione di nuove barre la cui morfologia non è purtroppo determinabile con accuratezza a causa di un riflesso sulla foto aerea. Il limite interno del Banco, che segna il passaggio all'area di retrobarriera, rimane grossomodo nella stessa posizione rispetto al 1954.

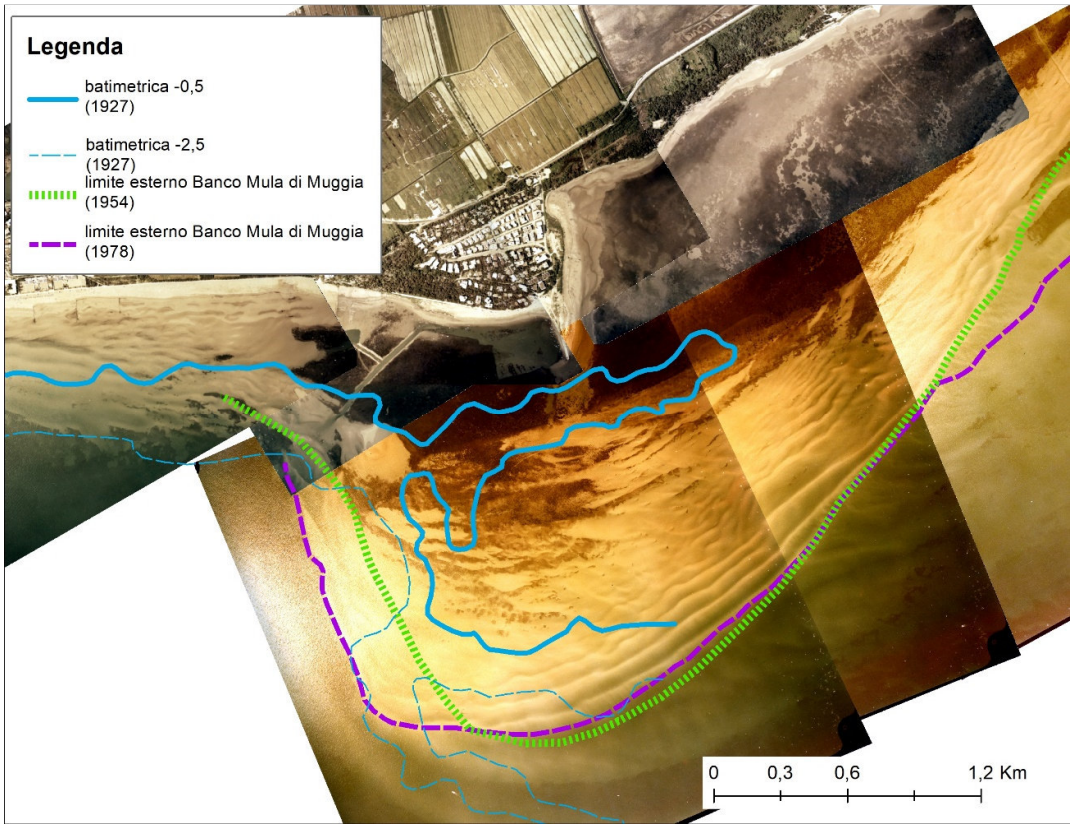


Figura 3.26 – Posizione del limite esterno del Banco della Mula di Muggia ricavata dall'interpretazione dela foto aerea del 1978, messa a confronto con le situazioni pregresse.

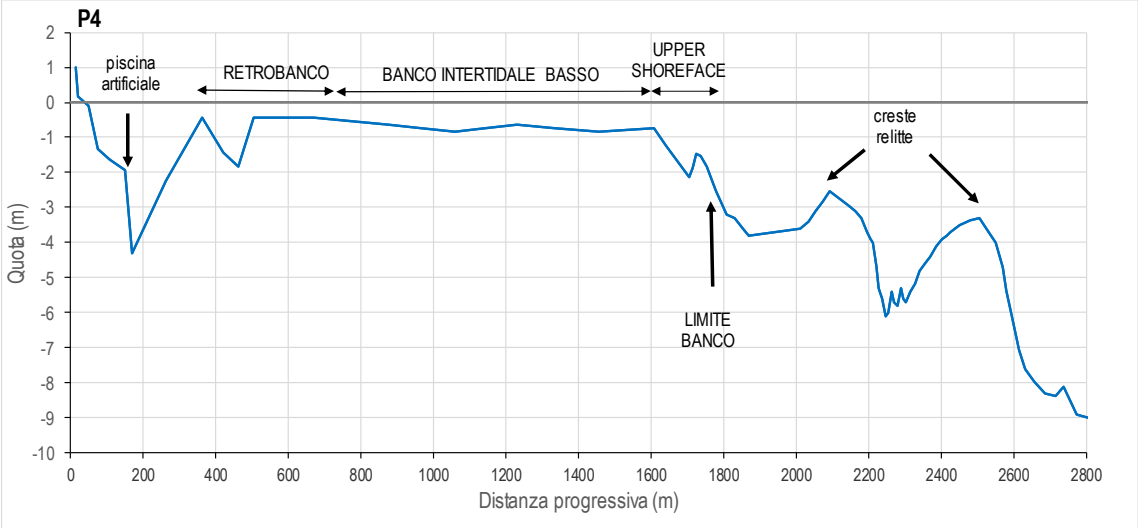


Figura 3.27 – Profilo batimetrico P4 del 1968 che interseca il Banco della Mula di Muggia con indicati alcuni elementi geomorfologici interpretati con l'ausilio della foto aerea del 1978, per l'ubicazione del profilo si veda la Tavola 12.

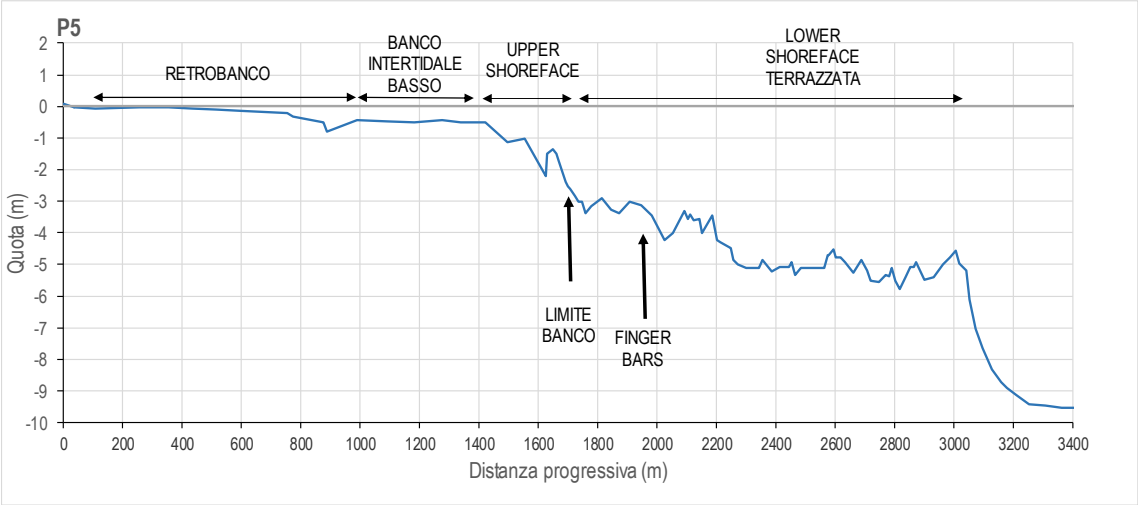


Figura 3.28 - Profilo batimetrico P5 del 1968 che interseca il Banco della Mula di Muggia con indicati alcuni elementi geomorfologici interpretati con l'ausilio della foto aerea del 1978, per l'ubicazione del profilo si veda la Tavola 12.

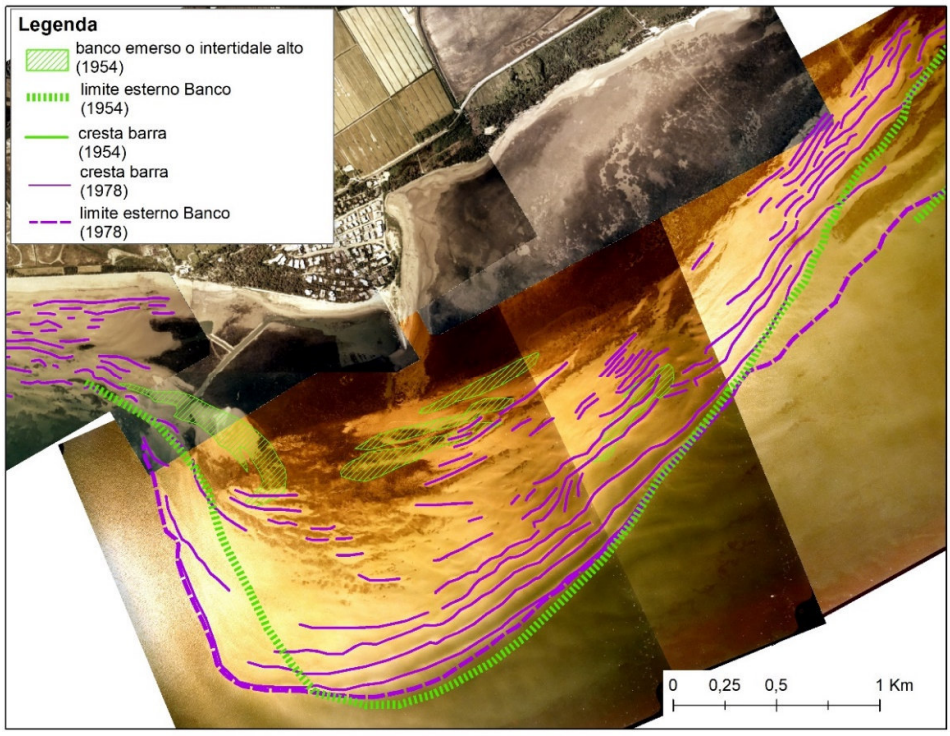


Figura 3.29 – Confronto di alcuni elementi morfologici mappati nel 1954 e nel 1978.

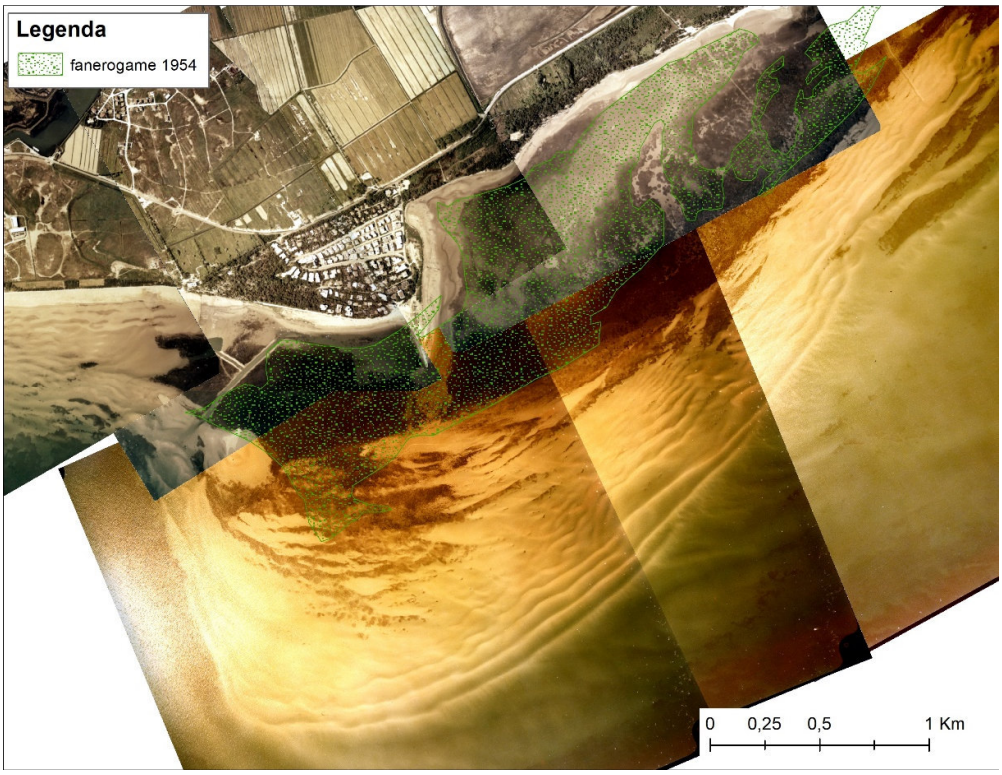


Figura 3.30 – Stralcio della foto aerea del 1978 con sovrimposte le aree di copertura a fanerogame del 1954.

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): l'entroterra non presenta modifiche di rilievo (rispetto alla cartografia del 1949) e la linea di riva appare fondamentalmente invariata anche nelle parti di litorale non stabilizzate, con l'eccezione del litorale immediatamente prospiciente alla Bocca di Primero che è stato arginato e stabilizzato colmando il piccolo canale precedentemente presente.

Sui fondali lungo tutto il litorale si sviluppa una fascia caratterizzata da fitta alternanza di barre parallele alla linea di riva parzialmente colonizzate da fanerogame, questa fascia ha ampiezza massima nell'aera prossima alla foce del Primero (790 m circa) e minima in prossimità della base della Punta del Becco (470m circa). Qui il sistema di barre si presenta distaccato dalla linea di riva isolando una vasta area di retrobanco con quote sui -0.3 -0.5 m (in base ai rilievi del 1968).

Il sistema di barre sembra aver guadagnato spazio verso mare, ma l'accuratezza della cartografia IGM su questo aspetto non è sufficiente per un corretto confronto. I confronti di profili realizzati da Studio Volta (profilo 23, Figura 3.33) indicherebbero un accumulo sul lungo termine sui fondali davanti alla foce (dal 1822 al 1978), confermato anche dal confronto 1973 -1978 nello stesso Studio.

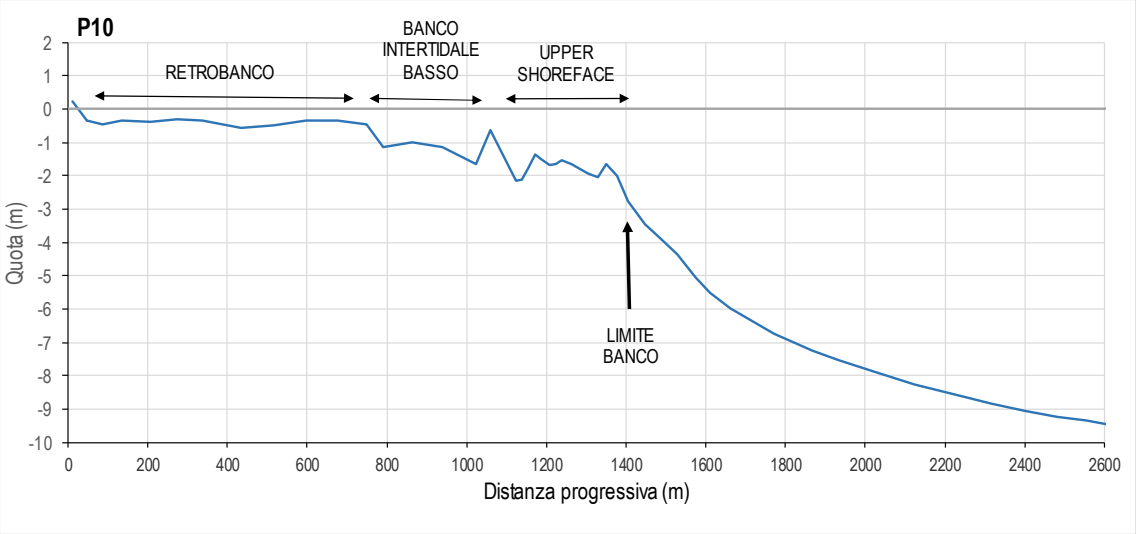


Figura 3.31 - Profilo batimetrico del 1968 che interseca i fondali di Fossalon con indicati alcuni elementi geomorfologici interpretati con l'ausilio della foto aerea del 1978.

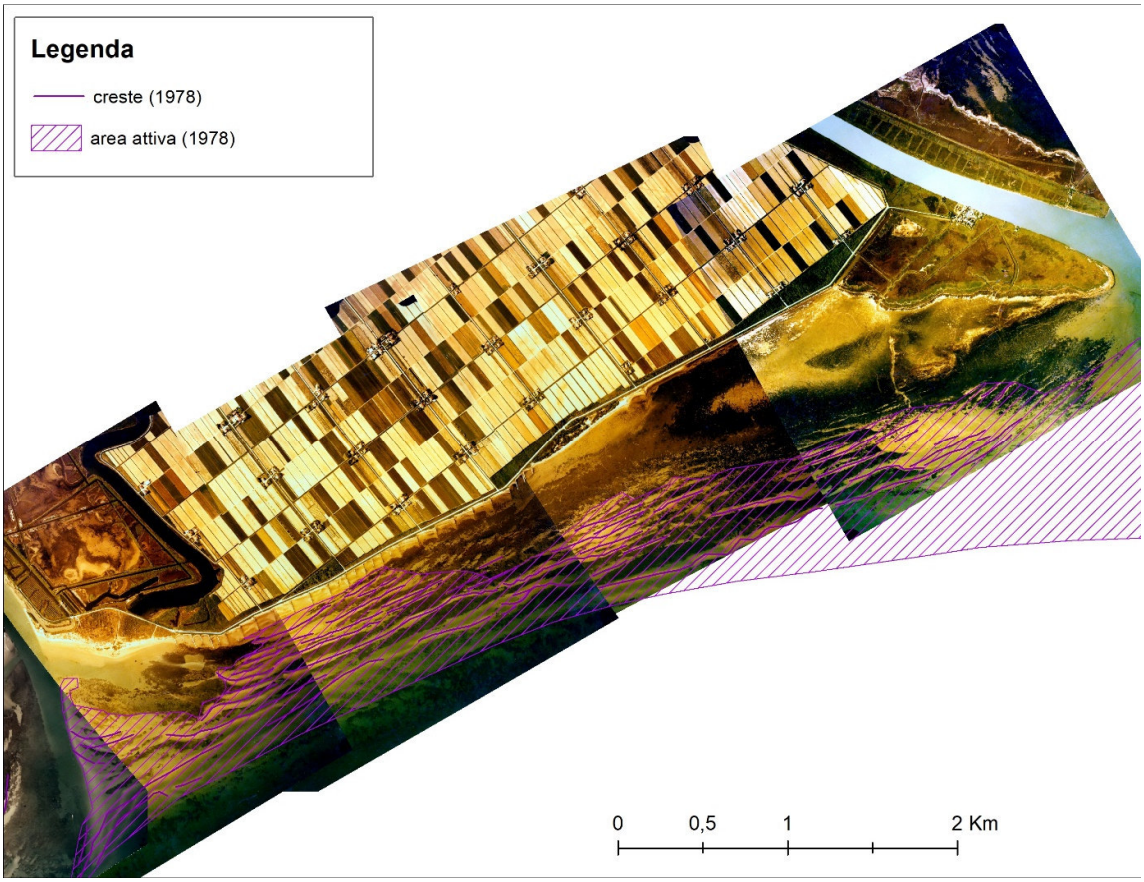


Figura 3.32 - Alcuni elementi morfologici mappati sulla base della foto aerea del 1978 per il tratto 5 (Fossalon).

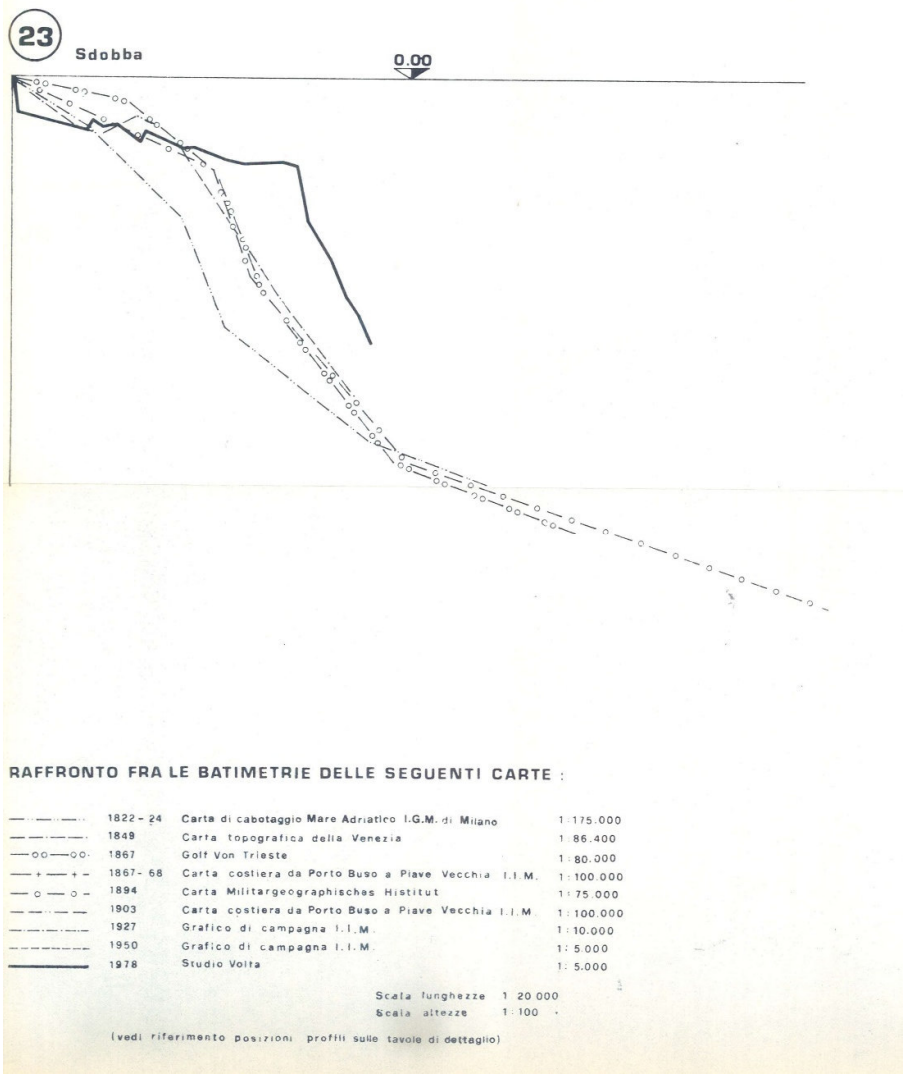


Figura 3.33 - Evoluzione dei fondali riportata in Studio Volta per il profilo 23 in corrispondenza della foce dell'Isonzo.

3.2.3. 1985

Per la descrizione del litorale all'anno 1985 abbiamo utilizzato:

- Cartografia (in particolare l'Allegato 3.12 - *Spiaggia sottomarina: zona dinamica e morfologia della Mula di Muggia e del Baroso,* Figura 3.34), descrizioni e rilievi batimetrici dello *Studio Brambati* (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 1985) (si veda paragrafo 2.1 e 2.4).

Si evidenziano di seguito soltanto gli elementi di variazione rispetto alla descrizione precedente facilmente riscontrabili dalla visione e sovrapposizione delle cartografie / foto aeree e dalla descrizione dell'Autore.

Nella cartografia di Figura 3.34 e di Figura 3.35 viene evidenziata l'estensione della fascia attiva della spiaggia sottomarina secondo lo *Studio Brambati* (1985). Durante le mareggiate in questa fascia avviene il massimo movimento dei sedimenti lungo riva (longshore). Il limite verso terra scelto dall'Autore, rappresentato dalla cresta del banco, esclude però una serie di barre che a nostro avviso vengono interessate dal moto ondoso durante gli eventi marini a più alta energia.

Figura 3.34 – Cartografia tratta dallo Studio Brambati (1985), Allegato 3.12 - Spiaggia sottomarina: zona dinamica e morfologia della Mula di Muggia e del Baroso.

Grado (tratto 1): la spiaggia Costa Azzurra evidenzia un'ulteriore progressione della linea di riva con formazione di nuova spiaggia; la spiaggia emersa nel complesso raggiunge i 94700 mq. La fascia attiva della spiaggia sottomarina non è ben individuabile dai profili batimetrici e davanti all'abitato di Grado, nella parte difesa dal murazzo l'Autore indica una grave situazione erosiva.

Grado spiaggia (tratto 2): nello *Studio Brambati* si riferisce di continui riassetti e rifluimenti sulla spiaggia e l'abitudine di seppellire in spiaggia grandi quantitativi di fanerogame spiaggiate.

Grado Pineta (tratto 3): in corrispondenza di Punta Barbacale, in particolare sul lato orientale del pennello è stata costruita una piccola darsena. *Studio Brambati* riferisce anche qui di rifluimenti recenti della spiaggia.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): *Studio Brambati* riferisce rifluimenti "eseguiti di recente" in varie località (Camping Europa e Punta Spin) con il duplice intento di ampliare la spiaggia emersa e creare altrettante "piscine" per agevolare la balneazione.

Banco della Mula di Muggia: il confronto della posizione della batimetrica -1 m e -3 m nella cartografia dello *Studio Brambati* (1985) con il limite esterno del banco tracciato grazie alle foto aeree del 1954 e 1978 (Figura 3.36*)* confermerebbe le tendenze precedentemente registrate e sottolineate dallo stesso Brambati. Vi è però una certa difficoltà / incertezza di interpretazione in quanto le batimetriche riportate non si prestano esattamente a un confronto diretto quantitativo.

La tendenza sul lungo termine può invece essere ben rappresentata dalla Figura 3.37 che mostra la forte migrazione verso ovest con arretramento del settore occidentale.

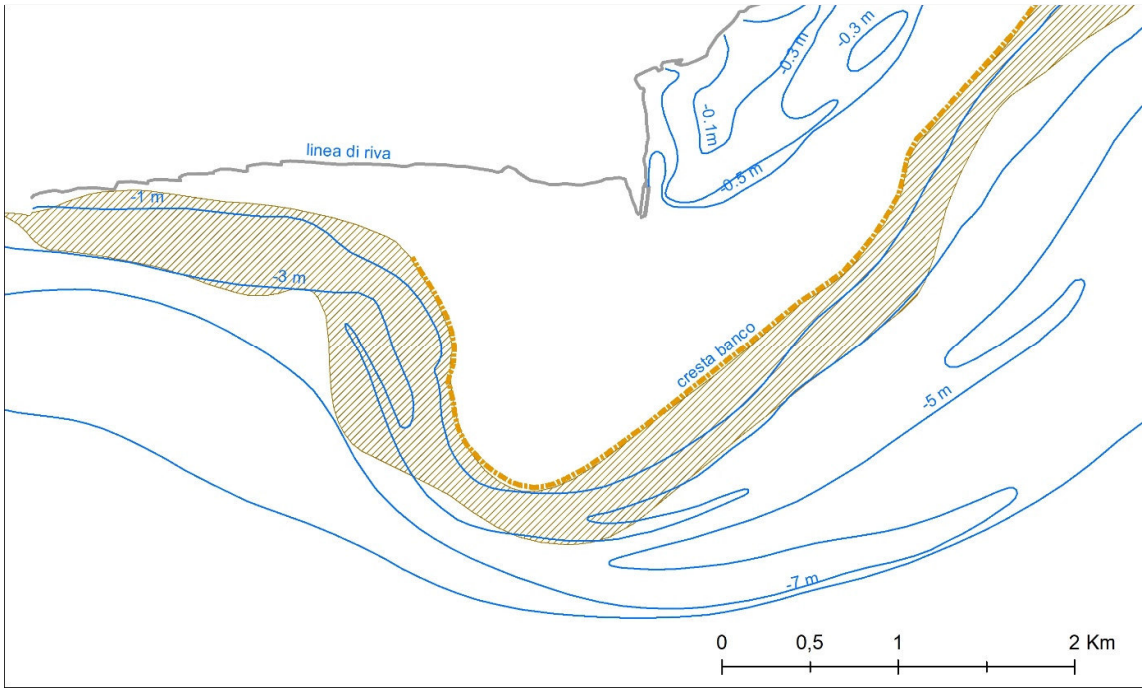


Figura 3.35 - Elementi morfo – batimetrici digitalizzati sulla base della cartografia ripotata nello Studio Brambati (1985). L'area campita rappresenta la fascia attiva della spiaggia sottomarina individuata dall'Autore.

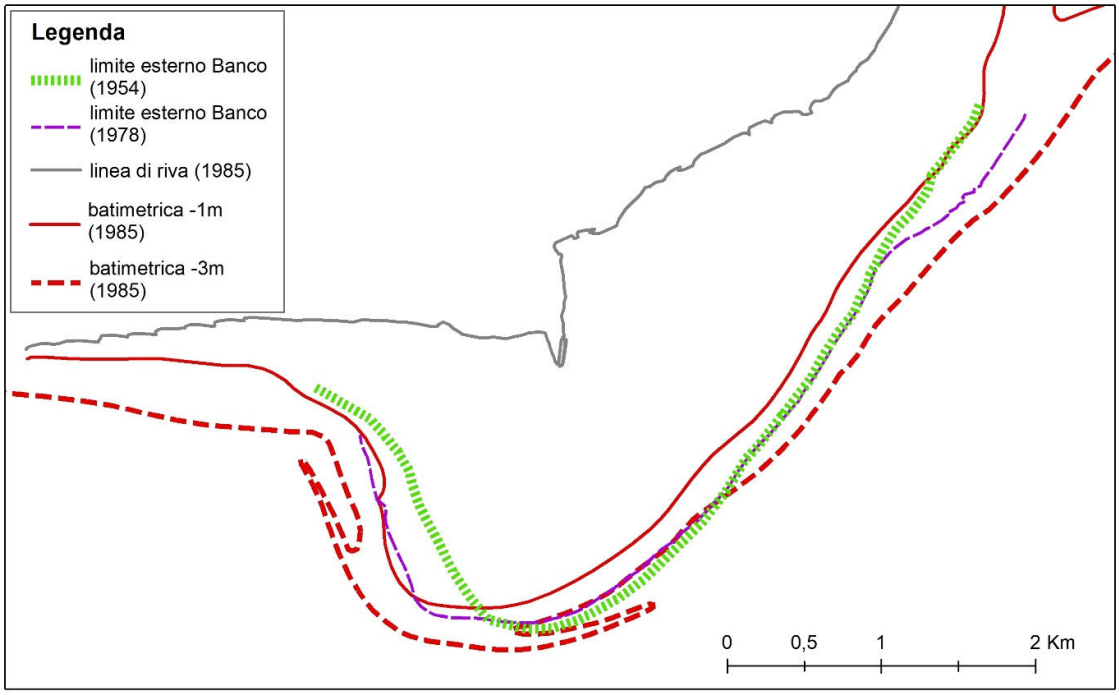


Figura 3.36 – Elementi di confronto della morfologia complessiva del Banco della Mula di Muggia desunti dallo Studio Brambati (1985) e dalle foto aeree precedenti.

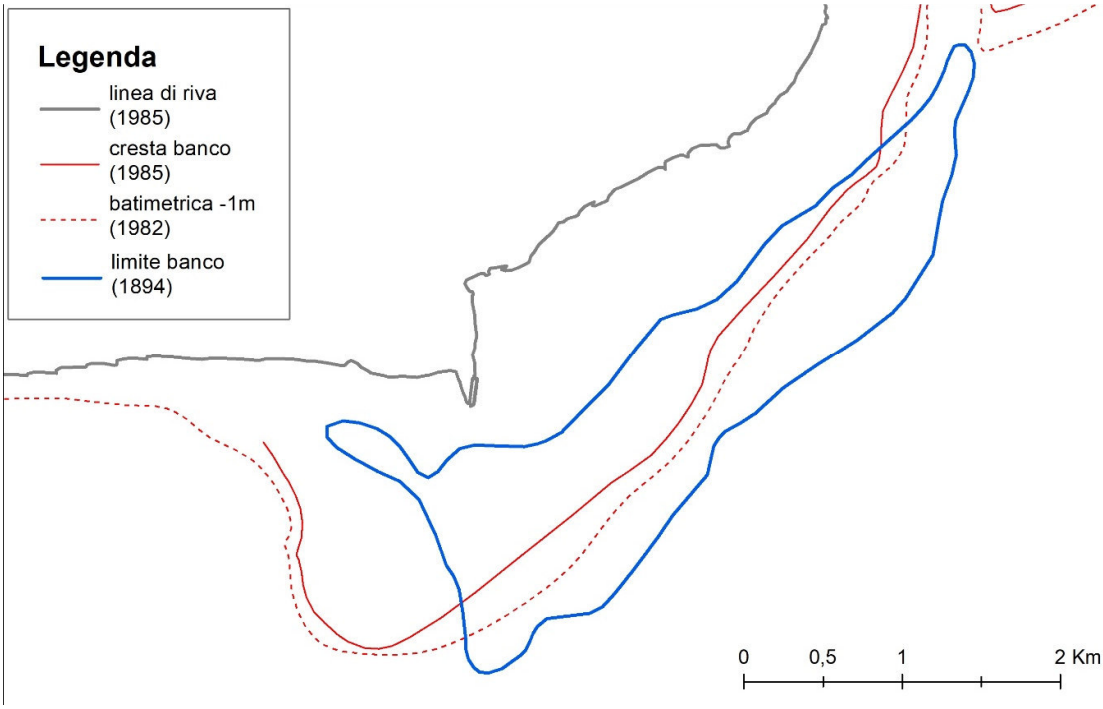


Figura 3.37 - Elementi di confronto della morfologia complessiva del Banco della Mula di Muggia desunti dallo Studio Brambati (1985) e dalle carte storiche.

3.2.4. 2007

Per la descrizione del litorale all'anno 2007 sono stati utilizzati

- orto-foto digitali a tre bande (Blu, Verde e Infrarosso vicino) del 2007 consultate sul sito del Geoportale Nazionale (http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/), presentate nella Tavola 7.
- Profili topobatimetrici del 2007 (cfr par. 2.4 e Tavola 13).

Tutti gli elementi mappati grazie alla foto – interpretazione e con il supporto dei dati sopra esposti sono presentati nella Tavola 3.

Grado (tratto 1): sul lato interno alla bocca di Grado sono evidenti nuove darsene. La spiaggia Costa Azzurra mostra una stabilizzazione con un parziale arretramento della linea di riva rispetto al 1985 nella parte più occidentale, con valori massimi di 29 m, la superficie complessiva di spiaggia passa a 86700 mq con una perdita quindi pari a circa 7300 mq rispetto al 1978.

L'evoluzione della linea di riva e dei fondali antistanti nel periodo 1968-2007 è ben rappresentato nel profilo di confronto n°1 1968 – 2007 (Tavole 12 e 13), dove è ben visibile l'avanzamento della linea di riva. L'accrescimento è invece più modesto anche se evidente per i fondali antistanti. La cresta della barra sottomarina posta a -1.27 m di profondità risulta allineata alla testata del molo foraneo e ciò significa che il trasporto longshore non viene più ostacolato dallo stesso se non in maniera ridotta.

Per i fondali davanti al murazzo non esistono invece dati aggiornati e quindi non possono esser fatte considerazioni sulla loro evoluzione recente.

Grado spiaggia (tratto 2): il retrospiaggia e l'entroterra sono stati oggetto di ulteriori estese urbanizzazioni. Sulla spiaggia la serie di pennelli già esistente è stata estesa con l'aggiunta di un nuovo pennello a est dell'ultimo. La linea di riva mostra un guadagno di spiaggia sulla porzione occidentale e una perdita per quella orientale, ma i continui interventi di riassetto e rifluimento che vengono realizzati sulla spiaggia rendono la linea di riva un elemento geomorfologico poco adatto a trarre considerazioni sulla dinamica costiera e sugli andamenti evolutivi del litorale. Le deboli falcature tra i pennelli indicano comunque un trasporto longshore di sedimenti diretto da ovest verso est.

Sui fondali antistanti è ben visibile una fitta presenza di barre il cui limite verso mare è costituito approssimativamente dalla batimetrica -2 m. Questa fascia appare molto simile in estensione a quella esistente nel 1978 e risulta di ampiezza minima (100 m) all'estremo occidentale del tratto e aumenta man mano verso est, raggiungendo i 560 m in corrispondenza dell'ultimo pennello. Le barre assumono una conformazione festonata sottoriva per divenire parallele un po' più al largo. Superata la batimetrica -2 m vi è la presenza ancora di qualche ondulazione e il fondale appare colonizzato dalle fanerogame. Un forte accumulo di sedimenti entro i 2m di profondità è ben visibile per il periodo 1968-2007 dal confronto per il profilo 2 (Tavola 12), la fase maggiormente significativa di questo accumulo deve quindi essere avvenuta nell'intervallo di tempo 1968-1978. Ulteriore, significativo accumulo si ha nella fascia di profondità compresa tra i -2 m e i -4.5 m riscontrata anche da Marocco (2000) e legata come vedremo meglio più avanti al progredire della parte esterna del Banco della Mula di Muggia verso ovest. La presenza al 2007 di copertura a fanerogame in questa fascia denota invece una sua parziale stabilizzazione.

Sulla parte più orientale del tratto si è sviluppato un banco sabbioso parzialmente emerso che, con andamento arcuato, rappresenta l'apice del Banco della Mula di Muggia e tende a raccordarsi con la spiaggia isolando dall'energia del moto ondoso circa 800 m di spiaggia, davanti alla quale si sono instaurate condizioni di bassa energia tipiche di un ambiente di retrobanco (Figura *3.38*).

Grado Pineta (tratto 3): se non ci sono variazioni di rilievo per quel che riguarda l'entroterra, la fascia costiera e i fondali antistanti sono stati interessati da un vasto intervento di sistemazione idraulico – morfologica progettato nelle sue linee generali da Brambati & Marocco (1982) e ripreso anche nello Studio Brambati (*Intervento sperimentale nell'ambito del Piano di risanamento del Mare Adriatico*).

L'intervento finalizzato soprattutto a migliorare la circolazione idrica davanti alla spiaggia di Grado Pineta è consistito in:

- Rifluimento della spiaggia di Grado Pineta con estensione verso mare della sua ampiezza;
- Taglio alla radice del promontorio di Punta Barbacale;
- Escavo di un canale artificiale identificato in Figura *3.39*, che riprendeva solo in parte il tracciato del precedente canale.

Figura 3.38 – Particolare della foto aerea del 2007, con evidenziato il banco emerso prospiciente alla porzione orientale della spiaggia di Grado, è ben evidente anche l'ampia estensione della barre sui fondali davanti alla spiaggia.

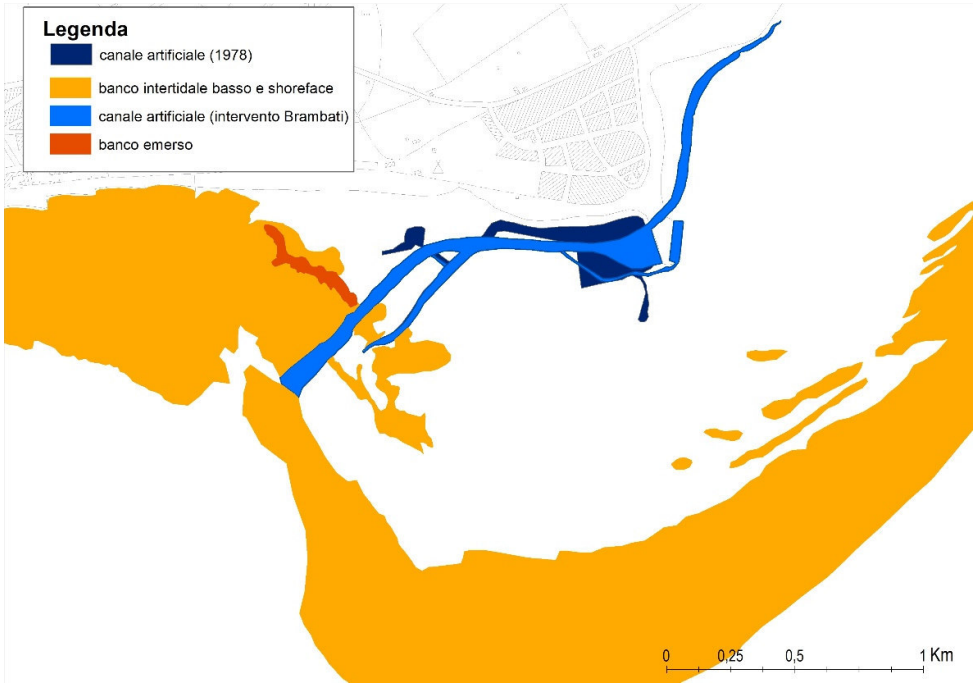


Figura 3.39 – Tracciato dei canali artificiali risultanti dai diversi interventi realizzati sui fondali antistanti Grado Pineta.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): il tratto presenta nuove estese aree urbanizzate sia nel retrospiaggia (tra la strada e la spiaggia stessa) con un villaggio turistico costruito ex novo e ampliamenti di strutture

presenti, sia nell'entroterra (che nel 1978 era esclusivamente a vocazione agricola) con la realizzazione di un campo Golf e di un'area urbanizzata. In destra della bocca di Primero è stata inoltre aumentata la superficie destinata all'utilizzo nautico da diporto con due darsene.

Davanti alla spiaggia l'area di retrobanco si mantiene con la stessa ampiezza rispetto al 1978 ed appare solcata da alcuni sottili canali artificiali che hanno lo scopo di consentire l'uscita in mare di piccole imbarcazioni alloggiate su piccoli moli perpendicolari alla linea di riva.

Banco della Mula di Muggia: il sistema del Banco è molto ben visibile nella foto aerea (Figura *3.40*) ma come già detto non è ben coperto in tutta la sua morfologia dai rilievi coevi.

Il bordo orientale e la parte apicale conservano una posizione grossomodo immutata rispetto al 1978 come si vede anche dai profili 4 e 5 del confronto 1968-2007 nelle Tavole 13 e 14. Una vistosa migrazione verso ovest coinvolge invece ancora una volta la parte occidentale, a ulteriore conferma della tendenza già vista; essa è ben identificabile nel profilo 3 (confronto 1968-2007 nella Tavola 13). Un significativo arretramento del limite esterno del banco si osserva solo in corrispondenza del profilo 5 (si veda confronto 1968-2007 nella Tavola 14).

La parte più esterna del banco, interessata da evidenti barre che costituiscono la fascia dove avviene il massimo del trasporto longshore, appare ridotta in ampiezza rispetto al 1978. Sul lato orientale è costituita da una serie di barre parallele (almeno 6), le cui creste assumono a tratti un andamento festonato (*crescentic*) nella parte più interna. Esse cambiano ulteriormente forma nella parte apicale del Banco dove risentono evidentemente di un'interferenza tra corrente / ondazione proveniente da più direzioni. Sul lato orientale del Banco sono nuovamente riconoscibili le *finger bars* individuate sulla foto aerea del 1978 collocate nella medesima posizione.

La parte interna del Banco appare interessata da un fenomeno di colonizzazione da parte delle fanerogame che interessa evidentemente le barre che non sono investite in maniera continua dal movimento della sabbia. L'estensione della prateria a fanerogame rispetto al 1978 risulta così notevolmente aumentata (Figura *3.41*).

Figura 3.40 – La Mula di Muggia nella foto aerea del 2007.

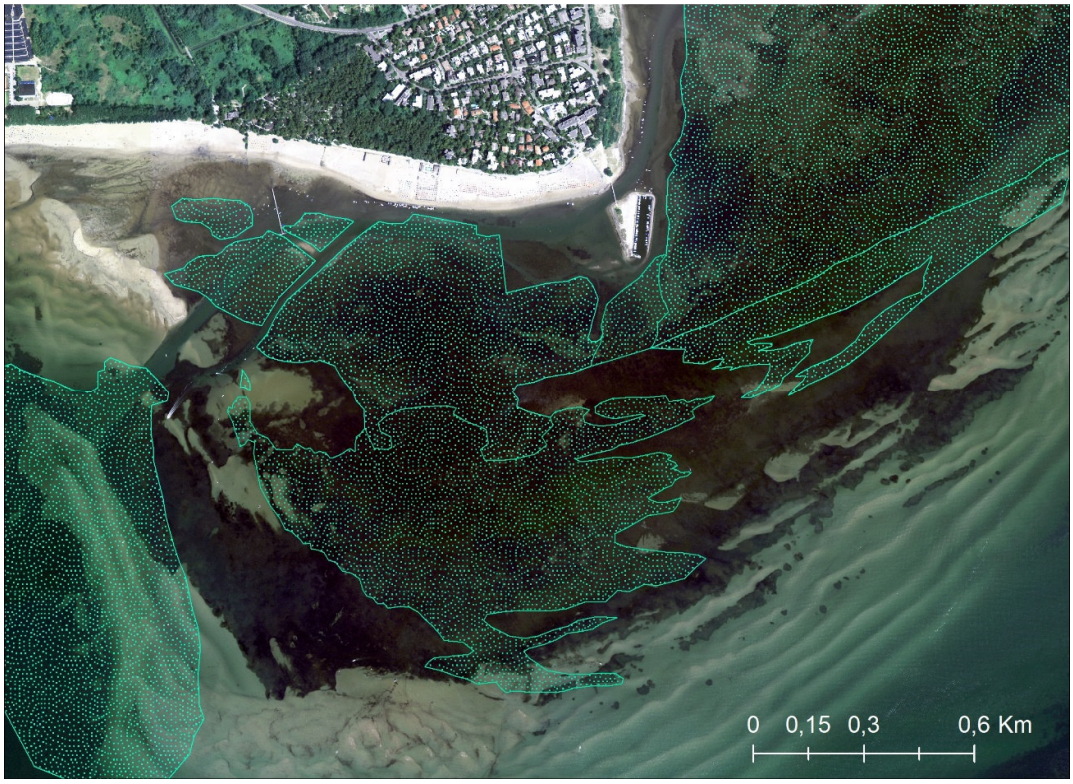


Figura 3.41 - Particolare della foto aerea del 2007, con evidenziato con sovrasegno azzurro la distribuzione delle fanerogame nel 1978.

Prosegue anche la costruzione di una nuova parte di banco sul lato occidentale con evidente formazione di nuove barre le cui creste assumono direzione quasi nord – sud e arrivano a occludere parzialmente la testa del canale escavato artificialmente. Il limite interno del Banco, che segna il passaggio all'area di retrobanco rimane grossomodo nella stessa posizione rispetto al 1978 per tutta l'area compresa tra la bocca di Primero e il limite del tratto 3.

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): l'entroterra non presenta modifiche di rilievo e la linea di riva appare fondamentalmente invariata anche nelle parti di litorale non stabilizzate, con l'eccezione del litorale immediatamente prospiciente alla Bocca di Primero che ha subito un arretramento della linea di riva dell'ordine dei 50 m.

Da quanto si evince dal confronto tra le foto aeree 1978-2007 le fanerogame hanno colonizzato vaste parti dei fondali lungo tutto il litorale stabilizzando almeno in parte la fascia caratterizzata da alternanza di barre (shoreface). Il confronto dei profili 1968 – 2007 (si veda profilo 9 -10 nella Tavola 15) mostra in maniera molto chiara la formazione di nuove barre verso mare, impostate sul pre-esistente terrazzo posto a circa -2 m di profondità. La fascia di accrescimento ha un'ampiezza di 170 m per il profilo 9 e di ben 500m per il profilo 10. Dal profilo 10 in poi verso la foce dell'Isonzo sono ben visibili una serie di barre arcuate che si dipartono dalla foce verso sud – ovest. Nelle batimetrie di Brambati (1985) questa protrusione non è visibile a causa della mancanza di rilievi in questo specifico tratto (nella foto area del 1984 si vede già in parte sviluppata). Essa indica chiaramente una fase accrescitiva da parte di sedimenti fluviali.

3.2.5. 2014

Dal 2007 non sono stati effettuati ulteriori rilievi topo-batimetrici: esiste quindi una carenza di dati quantitativi che abbiamo solo in parte colmato con la foto-interpretazione.

I dati utilizzati per la descrizione del litorale sono:

- Ortofoto a tre bande (Rosso, Verde, Blu) del 2014, commissionate da AGEA (Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura) e fornite dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
- Mappe ESRI, Digital Globe, Geoeye, consultabili su Bing (https://it.bing.com/maps/).

Poiché le ortofoto del 2014 non coprono tutta l'area indagata per il settore più a mare del Banco si è scelto di utilizzare una basemap di ESRI, Digital Globe, Geoeye. Di tale basemap tuttavia non si conosce l'esatta collocazione temporale (si stima attorno al 2015), inoltre l'immagine non è orto-rettificata e al limite verso mare risulta tagliata. Pertanto presenta dei limiti per una precisa interpretazione e quantificazione delle modificazioni avvenute.

Gli elementi mappati grazie alla foto – interpretazione sono presentati nella Tavola 4.

Grado (tratto 1): la spiaggia Costa Azzurra si presenta senza variazioni di rilievo, con un leggero avanzamento della linea di riva rispetto al 2007 di circa 11 – 12 m, Si nota che parte delle fanerogame marine che interessavano il fondale antistante questo tratto sono state ricoperte da nuovo sedimento. È sempre presente inoltre un sistema di barre.

Grado spiaggia (tratto 2): sulla spiaggia e nell'entroterra non vi sono evidenti modificazioni, tranne l'inizio dei lavori di disboscamento per l'avvio di "Grado 3". La linea di riva mostra un leggero guadagno di spiaggia sulla porzione occidentale e una perdita per quella orientale a partire dall'ultimo pennello fino alla Rotta.

Anche nel 2014 sui fondali antistanti è ben visibile la cospicua presenza di barre con andamento festonato sottoriva e parallele un po' più al largo. La variazione di queste morfologie rispetto alla presenza di fanerogame verso il largo, però, non è possibile da verificare poiché sia nelle ortofoto AGEA che su Bing l'area non è coperta dai fotogrammi.

Per quanto riguarda invece il banco sabbioso parzialmente emerso nel settore più orientale del tratto, esso risulta essersi ampliato verso l'entroterra (Figura 3.42). Tale ampliamento va ad isolare ulteriormente la spiaggia retrostante già interessata da condizioni tipiche di retro - banco ossia di bassa energia.

Grado Pineta (tratto 3): non ci sono variazioni di rilievo per quel che riguarda l'entroterra la fascia costiera e i fondali antistanti.

Da Grado Pineta a Primero (tratto 4): davanti alla spiaggia l'area di retrobanco si mantiene con la stessa ampiezza rispetto al 2007, e sono sempre visibili i sottili canali artificiali che permettono l'uscita in mare di piccole imbarcazioni. In tutta l'area le fanerogame sembrano aver colonizzato anche le piccole aree che nel 2007 erano liberi da vegetazione: ciò sta a indicare un aumento della stabilizzazione della zona.

Banco della Mula di Muggia: la mancanza di completa copertura di foto aeree e di rilievi batimetrici più recenti del 2007 impedisce di comparare in modo completo questo anno a quello precedente.

Per il bordo orientale e la parte apicale del Banco è impossibile determinare la posizione esatta del limite della shoreface, anche se nel complesso le morfologie sembrano conservare la medesima posizione del 2007. La migrazione del settore occidentale del banco invece è ben valutabile dalla foto aerea e risulta ancora in atto, presentando un leggero arretramento sul bordo più meridionale e una traslazione verso ovest su quello più occidentale, a ulteriore conferma della tendenza in atto a lungo termine (Figura 3.43).

Il sistema attivo di *shoreface* a creste-truogoli e la sua complementarietà con le formazioni di fanerogame si mantiene sempre presente; le barre mostrano un'elevata dinamicità e tendono a migrare da oriente vero occidente. Sul lato orientale, esternamente al limite del Banco le finger bars non sono più visibili dalle foto aeree. La parte interna del Banco appare pressoché invariata, come anche il limite interno del banco stesso.

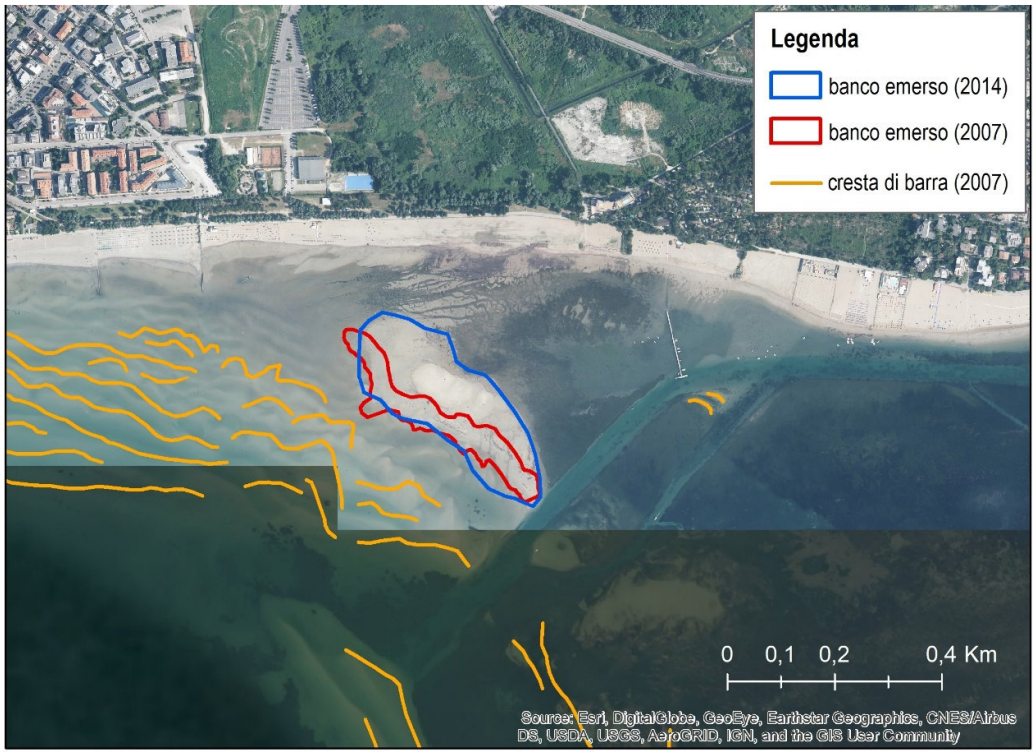


Figura 3.42 - Particolare della foto aerea del 2014 / 2015, con evidenziato il banco emerso prospiciente alla porzione orientale della spiaggia di Grado, è ben evidente anche l'ampia estensione delle barre sui fondali davanti alla spiaggia e l'estensione verso terra della barra che occlude il canale artificiale.

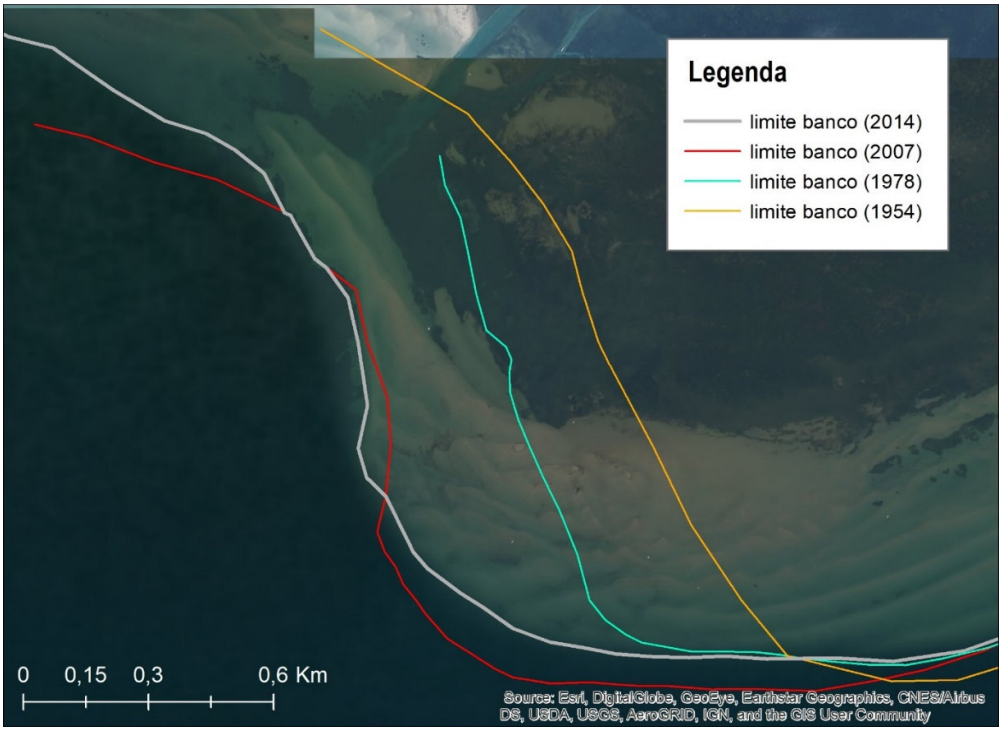


Figura 3.43 - Particolare della foto aerea del 2014 / 2015, con evidenziato il limite occidentale del Banco nella sua evoluzione nel tempo.

Da Primero a Punta Sdobba (tratto 5): sia l'entroterra che la linea di riva non presentano modifiche sostanziali rispetto al 2007.

Sui fondali lungo tutto il litorale risulta sempre presente la fascia di retro-banco a fanerogame e "microbial mats" e verso mare la shoreface, identificata dall'alternanza di barre parallele alla linea di riva. Queste fasce si presentano invariate in termini di ampiezza rispetto al 2007, ma le barre sono migrate verso occidente, a indicare la direzione del trasporto litoraneo. La foce dell'Isonzo risulta maggiormente interessata da depositi di sedimento, a indicare un maggior apporto solido o una recente piena. Si vuole poi indicare la presenza più evidente di un piccolo canale, probabilmente nato come artificiale, prospicente Fossalon, che presenta nella sua terminazione verso l'entroterra, la tipica morfologia dei canali lagunari.

3.2.6. Foto satellitari recenti

In Figura *3.44* è riportato uno stralcio della foto satellitare da Sentinel acquisita in data 01/01/2017 e scaricata dal sito https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel_data_access, mentre in Figura *3.45* sempre una foto da Sentinel ma datata 10/02/2018.

Tali foto sono state consultate al fine di avere, seppur solo qualitativamente, un quadro recente delle modificazioni in atto nell'area di studio. Tuttavia non è stata effettuata alcuna interpretazione a causa della inferiore risoluzione del dato rispetto a quanto utilizzato finora. Non si individuano variazioni di rilievo rispetto al 2014 né nella shoreface, né in altri elementi morfodinamici, solo minime modificazioni sulla copertura a fanerogame e mat algali in prossimità del Baroso.

È da citare infine per consultazione il link https://earthengine.google.com/timelapse/ : selezionando il comune di Grado è possibile avere un timelapse dal 1984 al 2016 dei fotogrammi disponibili dell'area e visualizzare così la dinamica della shoreface a barre nel tempo.

Figura 3.44 – Foto del 01/01/2017 da Sentinel.

Figura 3.45 – Foto del 10/02/2018 da Sentinel.

3.3. **Sintesi dell'evoluzione del litorale**

Nel complesso l'analisi geomorfologica condotta con l'ausilio della cartografia, delle foto aree e dei rilievi disponibili ha consentito di definire le modificazioni intercorse sui litorali tra Grado e la foce dell'Isonzo dal 1800 a oggi. Di queste, esposte nel dettaglio nei paragrafi precedenti, viene offerta una sintesi nel testo che segue e nelle Tavole 6 e 8.

Periodo I (1822-1894)

- La bocca di Grado non è armata e quindi non ci sono ostacoli al trasporto longshore verso ovest anche oltre l'abitato di Grado.
- Prime bonifiche e arginature di valli da pesca alle spalle dell'attuale Grado Pineta.
- Il canale di Primero è diretto parallelamente alla linea di riva verso ovest.
- Nel canale di Primero confluisce il canale Averto a est e l'Ara della Rotta a ovest.
- Il banco della Mula di Muggia è in continuità con i banchi a est e presenta una forma fortemente allungata verso ovest.
- Prime stabilizzazioni del litorale con arginature alle spalle delle spiaggia e chiusura di alcune bocche lagunari (Rotta dei Moreri).
- L'Isonzo sfocia alla Sdobba e alimenta tutto il tratto di litorale.
- Dal 1830 inizia un importante arretramento dei litorali in corrispondenza soprattutto della spiaggia di Grado e della bocca del Primero.

Periodo II (1894 – 1954)

- Grandi interventi di bonifica dell'entroterra tra Grado Pineta e la Foce dell'Isonzo.

- In seguito alla costruzione delle dighe di regimazione della Bocca di Grado (realizzate tra il 1927 e il 1934) inizia a formarsi la spiaggia Costa Azzurra di Grado per intercettazione del trasporto sedimentario longshore.
- Sbarramento del canale Ara della Rotta che confluiva nella bocca di Primero.
- Il canale di Primero e il canale Averto hanno due bocche separate.
- Il canale di Primero ha un nuovo sbocco al mare, dopo la nuova apertura il canale originario perde di efficienza idraulica e tende a interrarsi.
- L'Isonzo sfocia alla Quarantia e il litorale viene in gran parte privato degli apporti sedimentari isontini, la foce verrà riportata alla Sdobba nel 1937.
- Inizio dello sviluppo turistico – balneare di Grado.
- Stabilizzazione completa del tratto di spiaggia da Grado a Grado Pineta con massicci prelievi di sabbia dai fondali adiacenti e dal Banco della Mula di Muggia.
- Il Banco della Mula di Muggia subisce una migrazione verso terra e verso ovest.
- Massicci prelievi di sabbia sul Banco della Mula di Muggia e sui banchi adiacenti la foce dell'Isonzo da parte dei "sabbionanti".

Periodo III 1954 -1985

- Viene terminata la completa bonifica dell'entroterra togliendo ogni grado di libertà del sistema
- Primi rilievi topo - batimetrici del litorale, diverse campagne si susseguono ma i dati non sono sempre ben confrontabili tra loro (1968, 19723-73, 1978, 1985).
- Continuo accrescimento della spiaggia Costa Azzurra.
- Utilizzo turistico intensivo delle spiagge con continui interventi di riassetto, spianamento, rifluimento.
- Urbanizzazione turistica del litorale (Grado Pineta, campeggi), costruzione del promontorio di Punta Barbacale con modifica della circolazione idraulica dell'area di retrobanco denominata "baroso".
- Primi interventi di escavo di canali e piscine nell'area del "baroso".
- Sul lato orientale del banco si sviluppano finger bars.
- Si stabilizza l'apice del banco mentre il limite occidentale continua la sua migrazione.
- Il limite interno del banco si stabilizza e aumenta l'area colonizzata da fanerogame.
- La foce di Sdobba mostra un accumulo di sedimenti sui fondali.

Periodo IV 1985 - 2007

- Ultimo periodo di rilievi topo batimetrici (1985-2007).
- Prosegue l'accrescimento della spiaggia Costa Azzurra.
- Ulteriori estese urbanizzazioni nell'entroterra e del retrospiaggia.
- Intervento di riqualificazione del litorale di Grado Pineta con rifluimento della spiaggia, taglio del promontorio artificiale di Punta Barbacale ed escavo di un nuovo canale che però nel 2007 appare occluso verso mare dalla migrazione delle barre del Banco.
- Proliferazione di piccoli canali artificiali, piscine e piccole spiagge artificiali sul litorale tra Grado Pineta e Primero.
- Al largo della bocca di Primero si sviluppa un evidente corridoio di bypass con una fascia a finger bars che tendono a raccordarsi verso ovest al limite del banco.
- L'apice e il limite orientale del Banco non subiscono vistose modificazioni.
- Sul limite occidentale del Banco continua l'accrescimento con formazione di nuove barre.
- Colonizzazione da parte delle fanerogame marine di vasti settori di barre e truogoli nella parte interna del Banco. La parte orientale della spiaggia di Grado comincia a subire l'influenza

diretta del Banco con estensione della zona a barre e formazione di un banco emerso nell'area prospiciente alla spiaggia che tende a isolare circa 800 m di spiaggia dal moto ondoso.
- Aumento delle superfici a fanerogame anche per il tratto compreso tra Primero e foce Isonzo dove sono evidenti estesi accrescimenti dei fondali con formazione di nuove barre verso mare a indicare l'esistenza di apporto sedimentario da parte del fiume.

Periodo V 2007- 2014

- Assenza di dati topo - batimetrici e limitata copertura di foto aeree.
- La spiaggia Costa Azzurra è stabile.
- Aumento delle superfici a fanerogame nell'area di retrobanco.
- Il limite orientale del Banco e la parte apicale mantengono grossomodo la loro posizione.
- Continua l'accrescimento verso ovest delle barre del Banco e il piccolo banco emerso si mantiene e si amplia migrando in parte verso nord - ovest isolando un'ulteriore porzione di spiaggia turistica.
- I fondali a barre e truogoli del tratto tra Primero e foce Isonzo si mantengono e mostrano segni di migrazione verso ovest nel verso delle correnti longshore prevalenti.

I dati raccolti hanno permesso di evidenziare la progressiva migrazione del limite occidentale del Banco, secondo un trend costante nel tempo (Figura *3.46* e Figura *3.47*) per il periodo1830-2007. Il dato più recente (2014) appare invece in controtendenza. Esso andrà verificato con nuovi rilievi per capire se si tratti effettivamente di una tendenza in atto oppure di una modificazione momentanea.

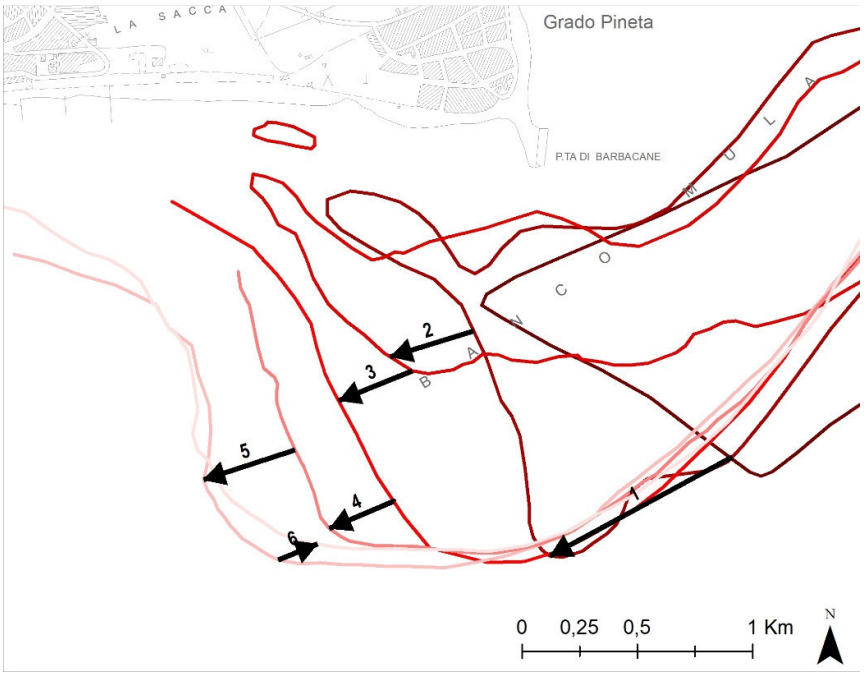


Figura 3.46 – Progressiva migrazione del limite del Banco dal 1830 al 2014.

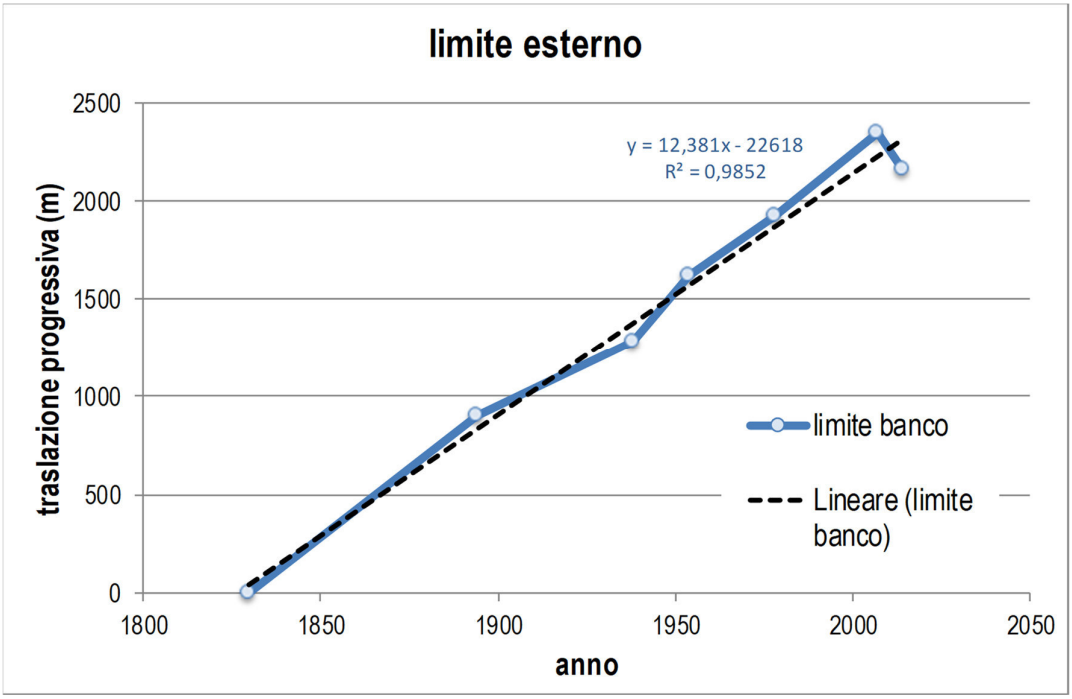


Figura 3.47 – Andamento della migrazione del limite del Banco dal 1830 al 2014.

4. Stima quantitativa delle tendenze erosive / deposizionali e bilancio sedimentario della fascia costiera

4.1. Analisi preliminare delle sezioni batimetriche

Come già accennato, uno degli scopi di questo lavoro è stato quello di effettuare un'analisi quali-quantitativa, dell'evoluzione dei fondali nell'area dei litorali gradesi compresi tra la bocca di Grado e la foce dell'Isonzo a partire dai dati già in possesso. Il metodo più corretto per valutare l'evoluzione del profilo della spiaggia emersa e sottomarina consiste nella sovrapposizione di sezioni di confronto.

Nel paragrafo 2.3 sono state presentate le levate batimetriche disponibili per l'intera area in esame (1968, 1979, 1985 e 2007). Esse sono state analizzate in maniera critica e confrontate, in termini di ancoraggio a terra, posizione, lunghezza, distanza tra i punti rilevati.

Dopo l'analisi preliminare dei profili si è deciso di effettuare un'analisi a coppie di anni e di prendere come riferimento gli anni 1968-2007. Le annate 1968-2007 sono risultate essere quelle più utili alla comprensione della dinamica morfo-evolutiva dell'area poiché i profili sono coincidenti in termini di posizione (l'ottica del rilievo del 2007 era stata proprio quello di replicare le sezioni del 1968) e sono inoltre posizionati in punti abbastanza validi per effettuare considerazioni in termini di budget sedimentario. La coppia 1979-1985 è stata comunque considerata ma i risultati sono stati ritenuti di importanza marginale in quanto i profili confrontabili sono troppo pochi, troppo corti, poco dettagliati e spesso non perfettamente coincidenti; i confronti che coinvolgono queste annate sono stati quindi utilizzati solo quale termine di confronto. In Figura 4.1 e nelle Tavole 9 e 12 è presentata l'ubicazione dei profili presi in considerazione nei confronti, identificati con una sigla attribuita per convenzione (C per la coppia di anni 1979-1985, P per quella 1968-2007).

Il passo successivo è stato quello di eseguire un'analisi geomorfologica dei profili selezionati (coadiuvata con l'interpretazione della foto aerea temporalmente più prossima) al fine di individuare le morfologie e indagare la loro evoluzione su sezioni. Tutti i profili presi in considerazione per i confronti sono riportati in Tavola 13, Tavola 14 e Tavola 15 per il 1968-2007, mentre in Tavola 10 e Tavola 11 per il 1979-1985.

Nell'analisi degli anni 1968-2007 si è preso come riferimento il dato del 2007 in quanto presenta un numero maggiore di punti di misura e quindi una maggior accuratezza nel rilevare la reale morfologia del fondale. L'analisi geomorfologica è consistita nel riconoscimento sui profili riportati in Excel di specifici elementi e indicatori geomorfologici (cresta di barra, truogolo, limite del banco, etc.), affiancata alla foto-interpretazione dell'ortofoto del 2007.

Un esempio del risultato ottenuto è riportato in Figura 4.2 (profilo P5 ubicato poco a est di Punta Barbacale), dove si individua un sistema barriera leggermente progradante in cui si distinguono una prima parte con pendenza molto dolce (che corrisponde alla zona di retrobanco con copertura a fanerogame), e una più esterna con barre e truogoli *(shoreface)*. Quest'ultima è stata individuata nell'ortofoto grazie all'evidenza del movimento delle masse sabbiose. Il limite verso mare del banco è identificato dalla prima rottura di pendenza del profilo che si conclude, alla sua base, col limite della barra esterna. Superato il limite del banco verso mare, si individuano una serie di creste e truogoli che s'impostano in un tratto pressoché pianeggiante, morfologicamente affine a un terrazzo. Tali morfologie sono identificabili, a seguito di un controllo planimetrico in foto aerea, come *finger bars*. Infine, a circa 3000 m dalla costa e a circa 5 m di profondità, oltre l'ultima barra, si definisce l'ultima e decisamente cospicua rottura di pendenza che si conclude con la base della scarpata a circa -9 m.

Il piede della barre esterna è stato determinato per tutti i profili (Tabella 4.1) e, successivamente, si è calcolata la media dei valori individuando nella batimetrica -2.7 m il limite verso mare del banco. Si è proceduto nello stesso modo per l'individuazione della batimetrica riferita alla profondità di chiusura che risultata essere -5.4 m (Tabella 4.1).

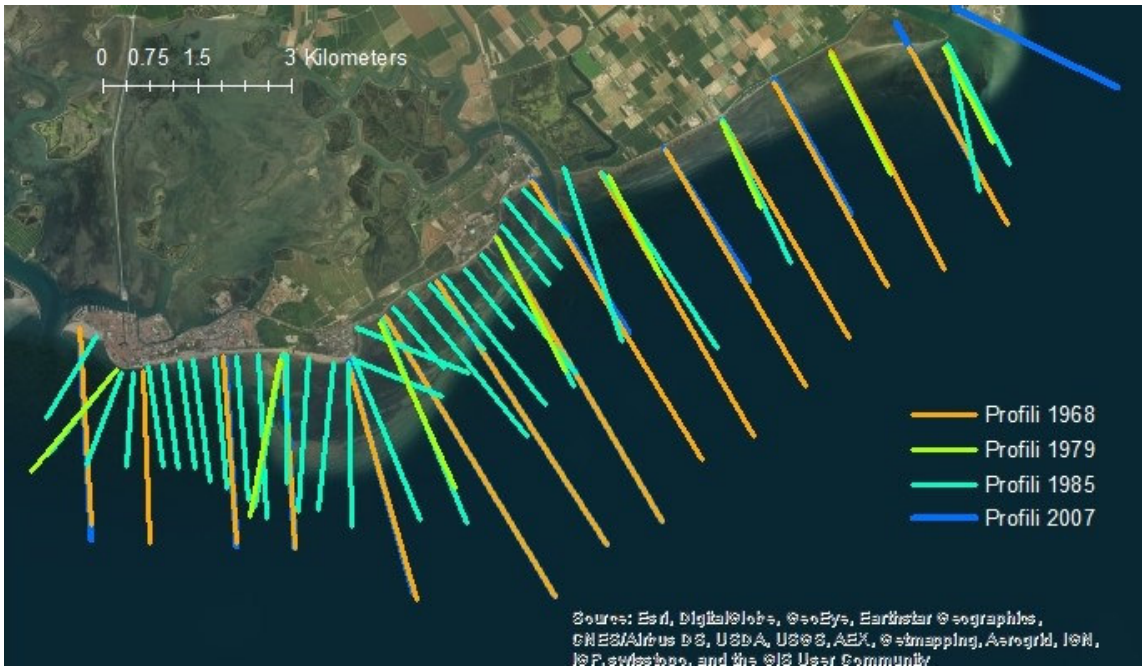


Figura 4.1 - Nell'immagine sono riportati i profili selezionati. In particolare, con il prefisso C si indicano i confronti riferiti alla coppia di anni 1979-1985, mentre col prefisso P i confronti dei profili riferiti alla coppia di anni 1968-2007.

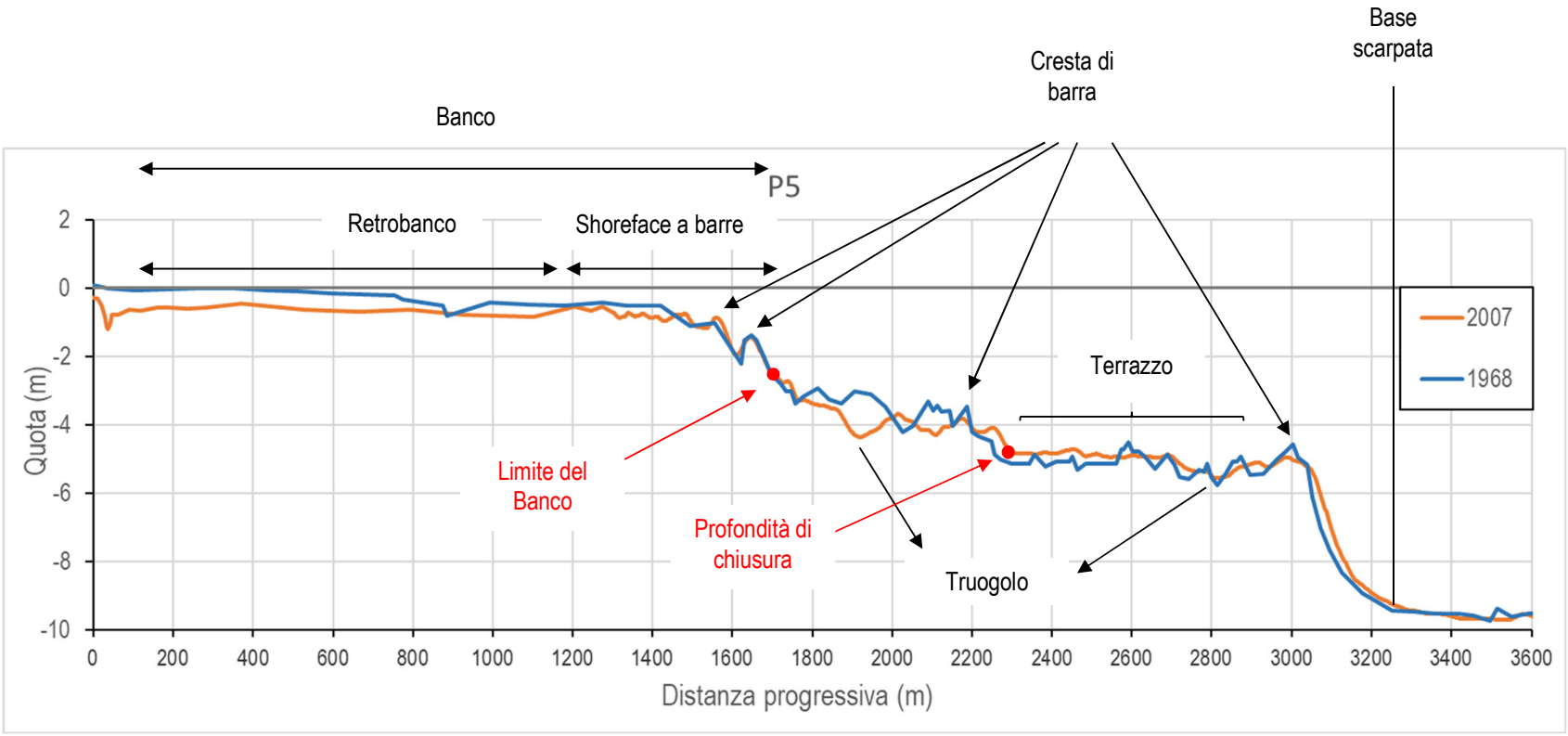
Tabella 4.1 - Valori del limite del banco e della profondità di chiusura individuati per ogni profilo e media calcolata. Nella determinazione della media della profondità di chiusura non sono stati considerati i valori evidenziati in quanto considerati troppo profondi.

Confronti 1968-2007	Limite del banco (m)	Profondità di chiusura (m)
P1	-3.06	-6.83
P2	-3.45	-5.60
P3	-2.52	-8.77
P4	-2.52	-5.50
P5	-2.70	-4.80
P6	-2.47	-5.50
P7	-2.88	-5.50
P8	-3.13	-4.60
P9	-2.01	-5.00
P10	-2.47	-8.93
P11	-2.58	-7.31
Media	**-2.7**	**-5.4**

Ulteriore esempio dell'analisi critica e geomorfologica eseguita sui profili è relativo al profilo P4 (Figura 4.3). Questo profilo parte da Punta Barbacale e attraversa uno dei settori più ampi e che ha subito maggiori evoluzioni del Banco. Anche qui sono stati riconosciuti i principali elementi geomorfologici, quali il limite del banco, la profondità di chiusura, le creste di barra e la suddivisione fra retrobanco e *shoreface*. Inoltre, su questo profilo sono state individuate due barre sottomarine di notevoli dimensioni, la cui origine non è nota. Esse sono indicate nella Tavola 13 come barre relitte. Questa morfologia nel corso della storia evolutiva del Banco non sembra aver avuto alcuna sostanziale modificazione.

Inoltre, grazie all'analisi di questo profilo, è stato possibile accertare come alcuni tratti delle sezioni del 1968 presentino delle dilatazioni o delle traslazioni delle morfologie, spiegabili solo con una scorretta restituzione del profilo batimetrico originale su supporto cartaceo. Appurato questo errore, di cui purtroppo non è possibile una quantificazione, abbiamo apportato delle modificazioni al profilo 4 del 1968, al fine di restituire una sezione che potesse essere il più possibile vicino a quello che si ipotizza essere la realtà. Il procedimento è consistito nel trovare delle morfologie stabili, anche analizzando le sezioni immediatamente vicine, e stirare la sezione per far combaciare questi punti fissi con la sezione 2007. Il risultato è riportato in Figura 4.4.

Figura 4.2 – Profolo P5, analizzato ed interpretato. Vengono riportati gli elementi geomorfologici riconosciuti.



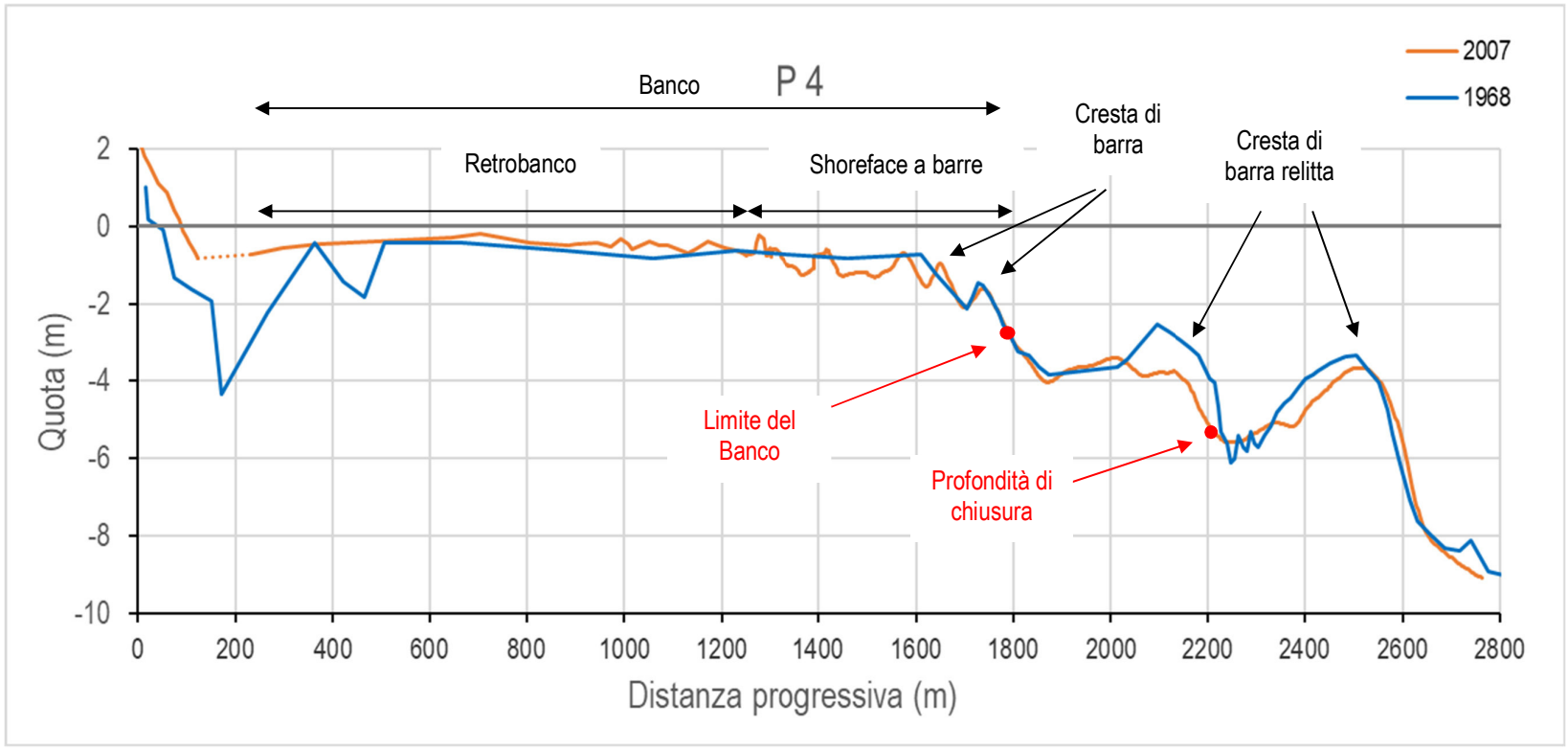


Figura 4.3 - Profolo P4, analizzato ed interpretato. Vengono riportati gli elementi geomorfologici riconosciuti.

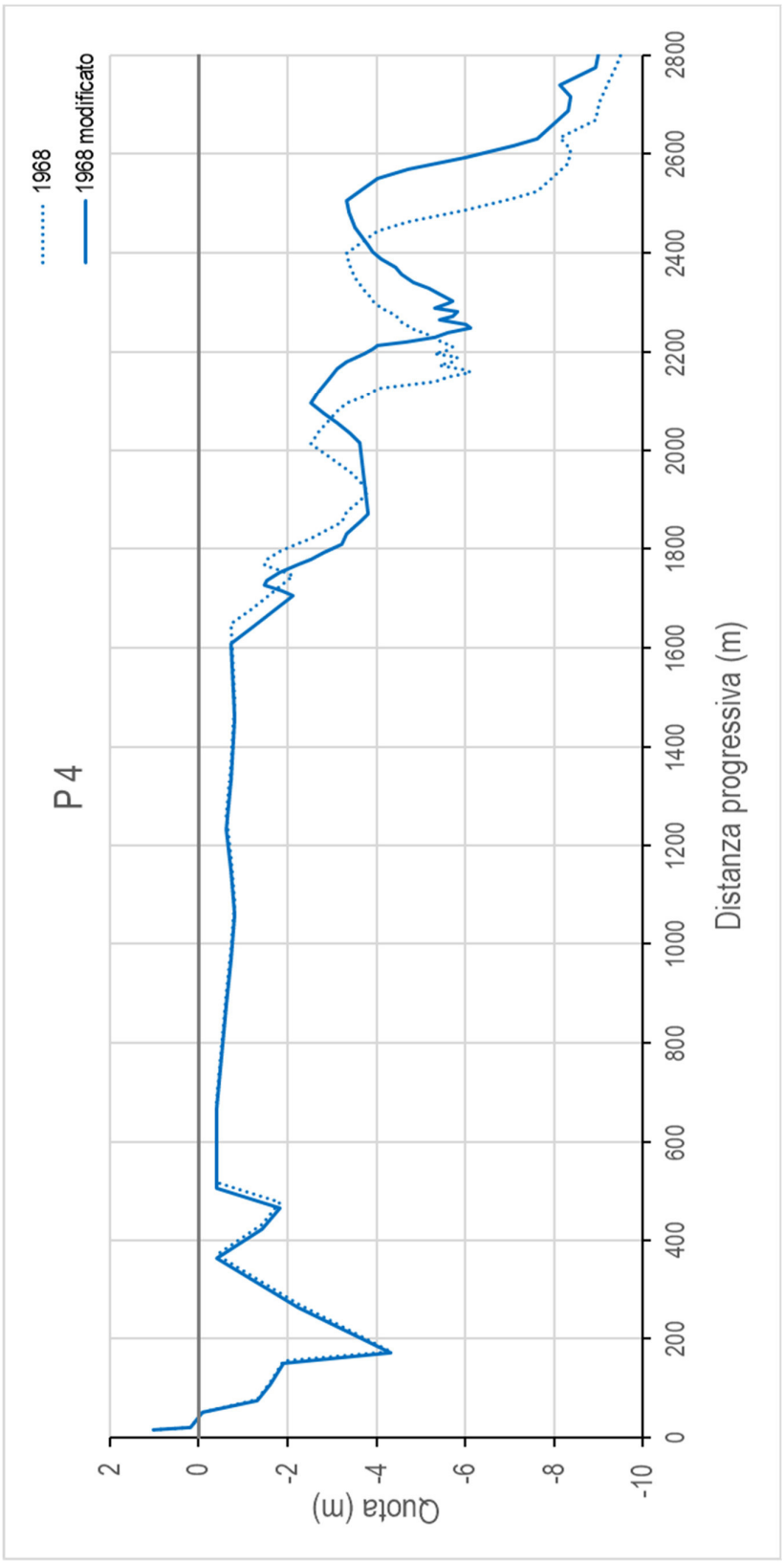


Figura 4.4 – Profilo P4 originale e modificato, esemplificativo degli errori riscontrati sull'anno 1968.

Lo stesso procedimento è stato effettuato anche per le annate 1979-1985. I profili del 1979 sono stati eseguiti con una densità di punti molto inferiore rispetto al 1985, com'è possibile vedere anche in Figura 4.5: il riconoscimento delle morfologie e i risultati ottenuti in merito alle variazioni volumetriche hanno quindi un maggiore margine di incertezza.

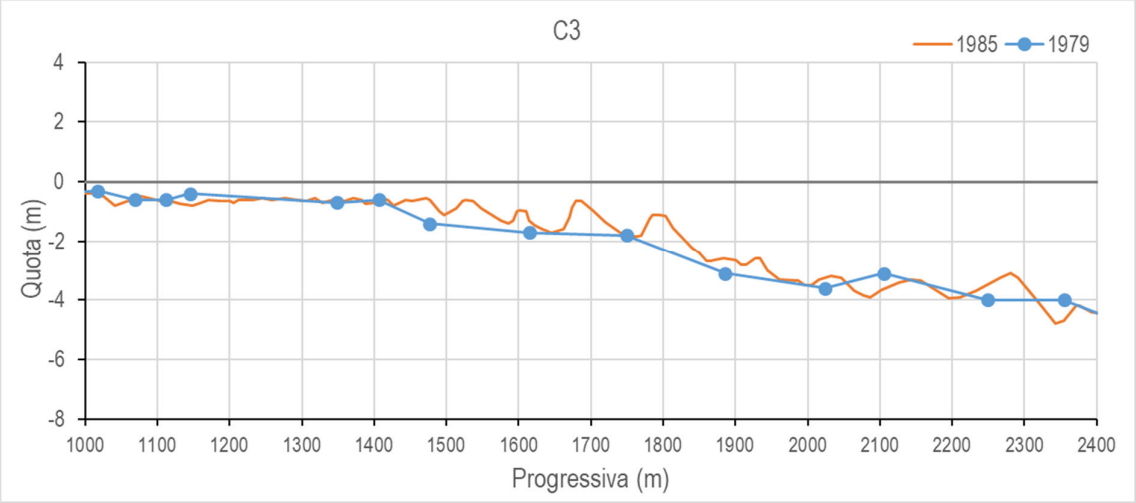


Figura 4.5 – Stralcio del confronto C3. In evidenza la serie riferita al 1979: con i cerchi si identificano i dati acquisiti e la loro notevole spaziatura.

4.2. **Confronto volumetrico su sezioni**

4.2.1. Metodologia

Una volta individuate le morfologie presenti nell'area oggetto di questo studio, ci siamo chiesti quale potesse essere l'entità della variazione dei fondali all'interno di ogni confronto, e cioè quale fosse il bilancio sedimentario.

I profili in Excel sono stati riportati in scala 1:1 in Autocad, tagliati a 0m (in modo da eliminare la spiaggia emersa), a -2.7 m (limite del banco) e -5.4m (profondità di chiusura), eliminando i valori più profondi o eventuali altre risalite di quota (ad esempio le creste di barra relitte) che avrebbero potuto inficiare il calcolo del budget. Per ogni rilievo sono stati chiusi quindi due poligoni: uno che comprende la parte di maggior dinamica della spiaggia sottomarina che va da 0 a -2.7m (indicata come fascia b) e uno che comprende una fascia via via sempre meno dinamica fino alla profondità di chiusura (indicato come fascia c). I file Autocad così preparati sono stati poi caricati in ESRI ArcGis 10.4 dove utilizzando una serie di algoritmi per l'analisi spaziale dei dati, sono state ricavate le differenze di superficie che corrispondono ai bilanci sedimentari per ogni singola sezione. Tali valori sono stati quindi esportati e utilizzati per effettuare i calcoli in Excel. Per ogni coppia di profili si è determinato il volume su metro lineare riferito a ogni fascia e il risultato ottenuto è stato diviso per il numero di anni intercorsi tra i due estremi dell'intervallo temporale, ottenendo così i tassi annui. Ne risulta quindi che le annate 1979-1985 forniscono un intervallo temporale intermedio rispetto al periodo complessivo di indagine 1968-2008. Si ricorda che l'ubicazione dei profili di confronto lungo il litorale è consultabile sulle Tavole 9 e 12.

4.2.2. Risultati del confronto

- Periodo 1968-2007

In Tabella 4.2 sono riportati i risultati ottenuti dal calcolo volumetrico e del tasso erosivo/deposizionale annuo per ogni profilo di confronto, e in Figura 4.6 la rappresentazione grafica tramite istogramma di solo quello volumetrico.

Tabella 4.2 – Bilanci e tassi annui per il periodo 1968-2007.

	Bilancio fascia b (m^3/m)	Tasso fascia b (m^2/anno)	Bilancio fascia c (m^3/m)	Tasso fascia c(m^2/anno)	Bilancio tot b+c (m^3/m)	Tasso fascia b+c (m^2/anno)
P1	105.63	2.71	-6.07	-0.16	105.63	2.71
P2	358.35	9.19	11.97	0.31	358.35	9.19
P3	2300.09	58.98	483.57	12.40	2300.09	58.98
P4	525.89	13.48	10.67	0.27	525.89	13.48
P5	-617.94	-15.84	-69.10	-1.77	-617.94	-15.84
P6	-516.63	-13.25	-484.69	-12.43	-516.63	-13.25
P7	-109.57	-2.81	-369.57	-9.48	-109.57	-2.81
P8	105.48	2.70	-110.31	-2.83	105.48	2.70
P9	341.57	8.76	-69.96	-1.79	341.57	8.76
P10	305.60	7.84	115.64	2.97	305.60	7.84
P11	1291.81	33.12	355.32	9.11	805.62	20.66

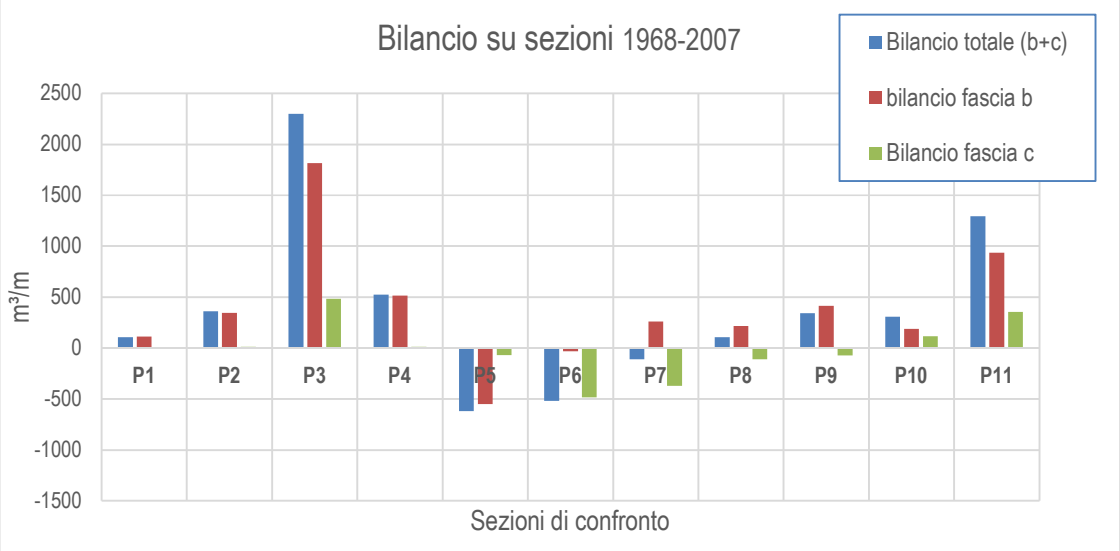


Figura 4.6 – Bilancio volumetrico dei profili di confronto, 1968-2007.

In generale si può notare come la fascia *b*, ovvero quella da 0 a -2.7 m, risulta essere la componente principale nella determinazione del bilancio, mentre quella più profonda (fascia *c* tra -2.7 e -5.4 m) ha minor importanza. Partendo dal confronto P11 posizionato in prossimità della foce dell'Isonzo e procedendo in direzione di Grado, si può vedere che il bilancio totale (b+c) sia nettamente positivo e diminuisca via via fino al confronto P7, posto in prossimità occidentale del Primero. Il bilancio risulta

negativo sui confronti P5 e P6, per poi tornare positivo e raggiungere il valore massimo in corrispondenza del confronto P3 (in località La Rotta). Questo accumulo coincide con l'area di migrazione del Banco in direzione nord-est individuata grazie alle foto aeree. L'andamento che si ricava da questi dati suggerisce la presenza di un corridoio di transito sedimentario che dall'Isonzo va verso Grado e che ha nella fascia tra 0 e -2.7 m la sua massima espressione. Nel complesso il bilancio è ampiamente positivo per questa finestra temporale.

- Periodo 1979-1985

Tabella 4.3 - Bilanci e tassi annui per il periodo 1979-1985.

	Bilancio tot b+c (m³/m)	Tasso fascia b+c (m²/anno)	Bilancio fascia b (m³/m)	Tasso fascia b (m²/anno)	Bilancio fascia c (m³/m)	Tasso fascia c(m²/anno)
C1	-291.59	-48.60	-47.66	-7.94	-243.93	-40.66
C2	-194.12	-32.35	-165.44	-27.57	-28.68	-4.78
C3	527.29	87.88	261.17	43.53	266.12	44.35
C4	-1266.76	-211.13	-396.77	-66.13	-870.00	-145.00
C5	44.56	7.43	93.98	15.66	-49.42	-8.24
C6	4.15	0.69	18.27	3.04	-14.11	-2.35

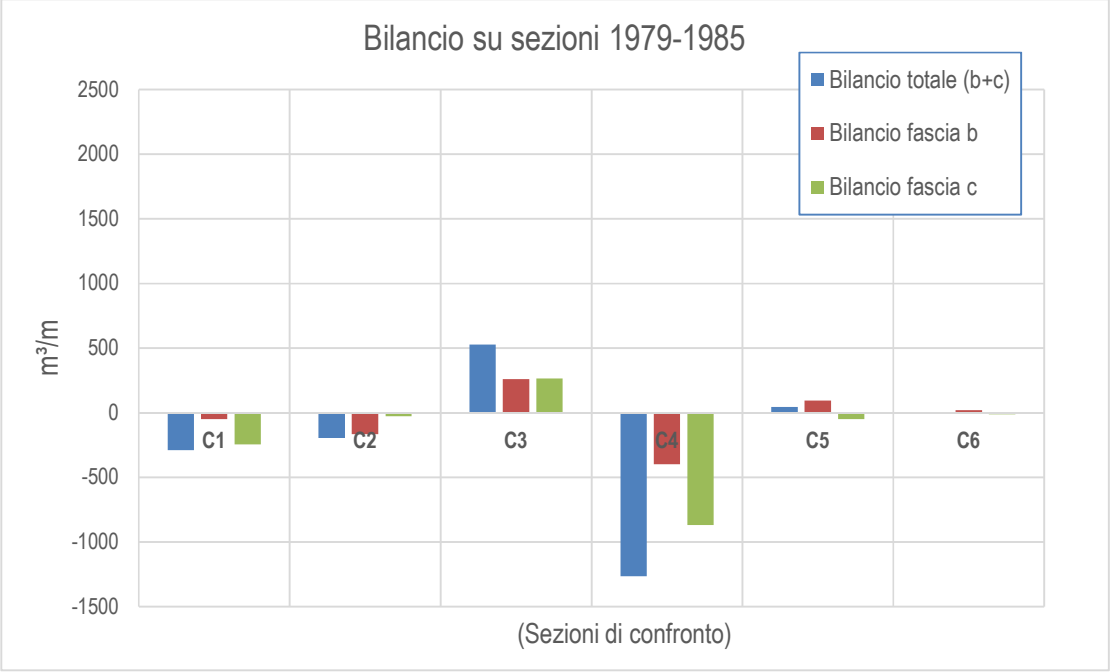


Figura 4.7 - Bilancio volumetrico dei profili di confronto, 1979-1985.

Premesso quanto detto in merito alla scarsa accuratezza dei profili del 1979, saltano all'occhio tuttavia i valori dei confronti C3 e C4:

- il C4, posto in prossimità di Villaggio Primero e quasi in corrispondenza del confronto P7, si presenta nettamente negativo, specialmente nella fascia profonda (*c*).
- Il C3, posto tra i profili P4 e P5 che sono nettamente positivi, presenta il volume positivo maggiore all'interno della coppia di anni 1979-1985.

In questo arco temporale il bilancio complessivo risulta nettamente negativo.

Confrontando questi due massimi con i massimi del periodo 1968-2007, sembrerebbe confermarsi la presenza di un corridoio di trasporto longshore che da oriente va verso occidente, con fasi localizzate erosive/di accumulo sedimentario. La mancanza di accumulo sedimentario significativo in corrispondenza di C6 sembrerebbe in disaccordo con quanto evidenziato dai confronti 1968-2007 per la stessa area (profili P9 e P10) ma è invece sicuramente imputabile allo scarso dettaglio del rilievo del 1979, come già evidenziato.

4.3. **Computi volumetrici da confronto tra DTM**

4.3.1. Metodologia

Per computare i volumi di materiale movimentato nell'area di studio, oltre al calcolo del bilancio su sezioni, è stato effettuato un computo a partire da DTM.

Secondo una metodologia già utilizzata dal *Coastal Group* (UniTS) per la laguna di Venezia (Sarretta et al., 2010) e per il *Geodatabase gestionale delle coste venete* (Fontolan et al., 2014; Fontolan et al., 2015) l'analisi prevede un'elaborazione in GIS con la creazione, per ciascuna levata batimetrica, dei rispettivi modelli batimetrici tridimensionali utilizzando una maglia di triangolazione irregolare (Triangulated Irregular Network, TIN), che viene poi convertita in raster giungendo alla costruzione di un DTM.

Le annate scelte per la creazione dei TIN sono state: 1968, 1985 e 2007. Per insufficienza e scarsa qualità del dato, non è stato prodotto il TIN del 1979.

A partire dai dati batimetrici a disposizione, sono state prodotte ulteriori *feature* lineari per aiutare il software a creare un modello tridimensionale geometricamente corretto: in particolare sono state tracciate delle polilinee rappresentanti le batimetriche dalla 0 alla -9 m, e alcune polilinee 3D che uniscono punti a quote diverse ma indicanti specifiche morfologie. Con questi elementi si è proceduto alla costruzione di un TIN. Tale procedimento è stato ripetuto anche per i dati batimetrici del 1985, anche se la profondità a cui si estende quest'ultimo TIN è inferiore (-5 m), a causa della minor lunghezza dei profili. Per la levata del 2007 inoltre i dati sono stati integrati con quelli relativi a una levata batimetrica eseguita da Stefano Caressa sul canale di Primero nel 2008.

Dai modelli TIN delle levate batimetriche sono stati estratti i raster con cella a 20 m (*grid*) e restituiti graficamente con una scala di colori che divide l'altimetria in intervalli di 20 cm; da essi sono state prodotte delle mappe delle variazioni altimetriche per differenza tra i raster di due levate batimetriche per volta. Va tenuto in considerazione che i rilievi del 1968 / 2007 sono molto diversi per spaziatura e copertura da quelli del 1985: i profili del 1985 sono infatti molto più fitti ma spesso più corti, arrivando in certi casi solo a una profondità di -2 m. Tale scostamento del 1985 può determinare un errore sulla corrispettiva carta delle differenze. Anche il confronto 1968-2007 può esser affetto da limitato errore, a causa delle imprecisioni sul dato del 1968 individuate in fase di confronto dei profili.

Il grid ottenuto è stato poi ritagliato sul limite a mare rappresentato dalla batimetrica -5.4 m riferita all'ultimo rilievo utilizzato per il confronto (2007) e sul limite a terra rappresentato dalla linea di riva dello stesso anno. Infine il grid è stato suddiviso in celle comprese tra due profili. I computi volumetrici si limitano quindi alla spiaggia sottomarina, dato che la densità di rilievi a terra non consentiva una ricostruzione sufficiente della spiaggia emersa. I grid ottenuti per ogni cella sono stati poi interrogati per calcolare il volume di materiale movimentato nella cella stessa e i rispettivi tassi annui.

4.3.2. Risultati

Utilizzando la metodologia descritta al paragrafo precedente sono stati ricavati i DTM per le tre annate : 1968, 1985, 2007 (Figura 4.8).

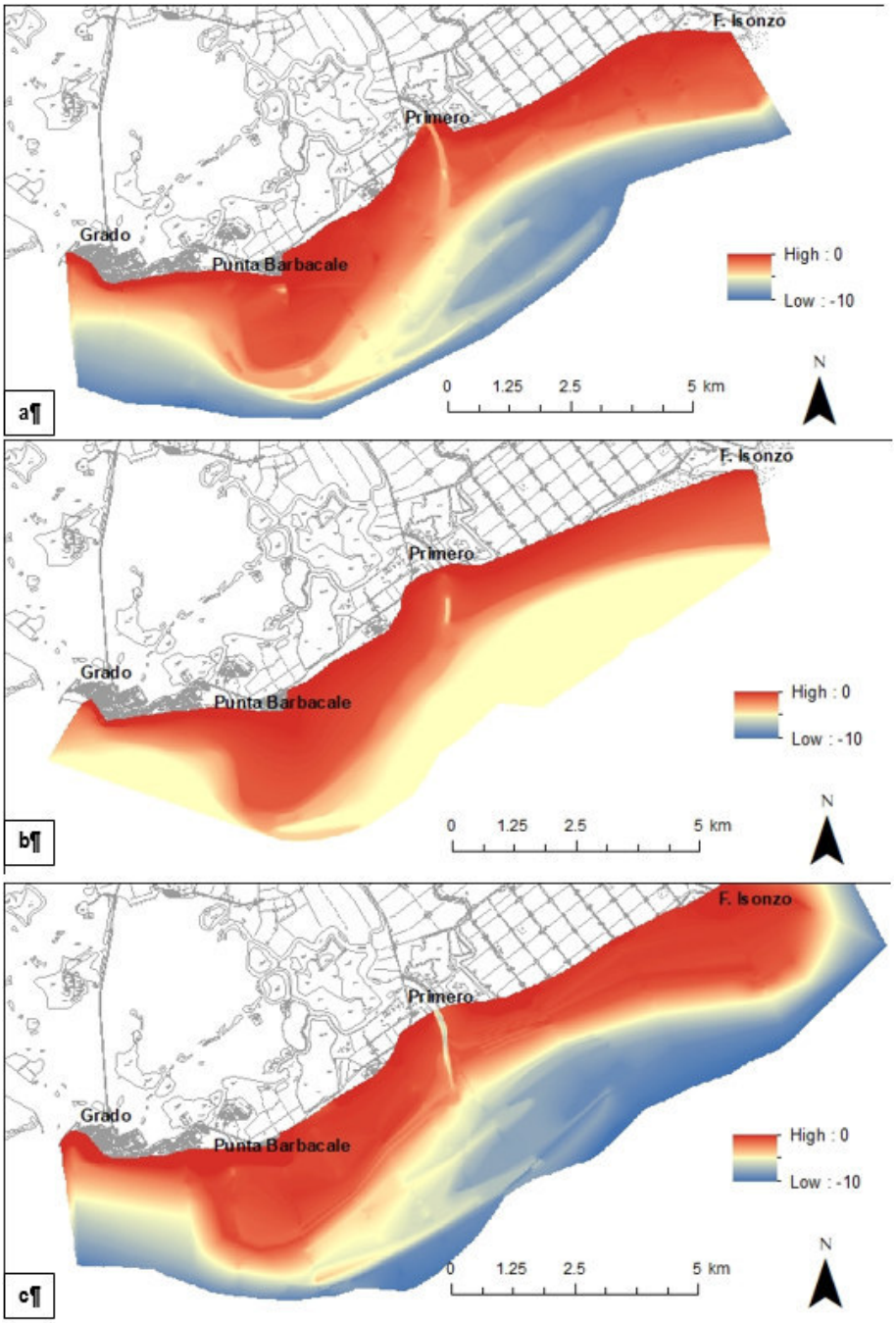


*Figura 4.8 – TIN del 1968 (**a**), del 1985 (**b**) e del 2007 (**c**) rappresentati con la medesima scala grafica. Il 1985 mostra una colorazione falsata verso il largo (toni gialli) a causa della chiusura dei profili rispetto alle altre due annate di confronto. I calcoli non sono comunque estesi in questa porzione areale.*

Di seguito sono riportate le carte delle differenze volumetriche a coppie di anni (1968-1985, 1985-2007, e quella complessiva 1968-2007).

Le carte sono state vestite con il seguente tematismo:

- laddove la situazione risulti stazionaria (entro uno scarto di ± 20 cm) la colorazione è grigia
- per volumi in accrescimento la colorazione è una scala di verdi via via più intensi con l'aumentare della positività
- dove invece si è avuta erosione la scala è quella dei toni dal giallo al rosso, man mano che aumenta l'entità dell'erosione.

Per determinare eventuali gradienti di accumulo/erosione, ovvero i tassi annui di variazione volumetrica tra un profilo topo-batimetrico e l'altro, sono state create delle celle con spaziatura uguale a quella dei profili originari, all'interno delle quali effettuare il calcolo. I dati sono rappresentati in un istogramma in cui ciascuna cella sedimentaria è definita da un doppio valore, uno riferito al termine di bilancio (positivo, negativo o nullo) non corretto (cioè basato sulle differenze volumetriche originarie), l'altro in forma corretta, cioè tenendo conto del possibile errore topografico o di rappresentatività topografica di dettaglio (data l'estensione delle morfologie a barre) entro l'intervallo di ±20 cm.

- Periodo 1968-1985

I risultati ottenuti per il confronto 1968-1985 sono costituiti dalla carta delle differenze altimetriche (Figura 4.9), dalla tabella riportante i bilanci ricavati per cella (Tabella 4.4) e dal relativo istogramma (

Figura 4.10). Com'è possibile notare dalla carta delle differenze sembra esistere un corridoio erosivo entro i 5 m di profondità che dal delta dell'Isonzo si dirama fino al canale di Primero. Tuttavia, dal punto di vista del bilancio sedimentario le celle 9, 8 e 7 sono comunque positive: infatti la parte negativa rappresentata dal corridoio erosivo viene bilanciata dalla presenza di un maggior volume nel settore sotto costa. Nettamente positivo invece, sia sulla rappresentazione grafica che nell'istogramma, è l'area della cella 3, che costituisce una trappola sedimentaria, che si estende, in minor misura sull'adiacente cella 2.

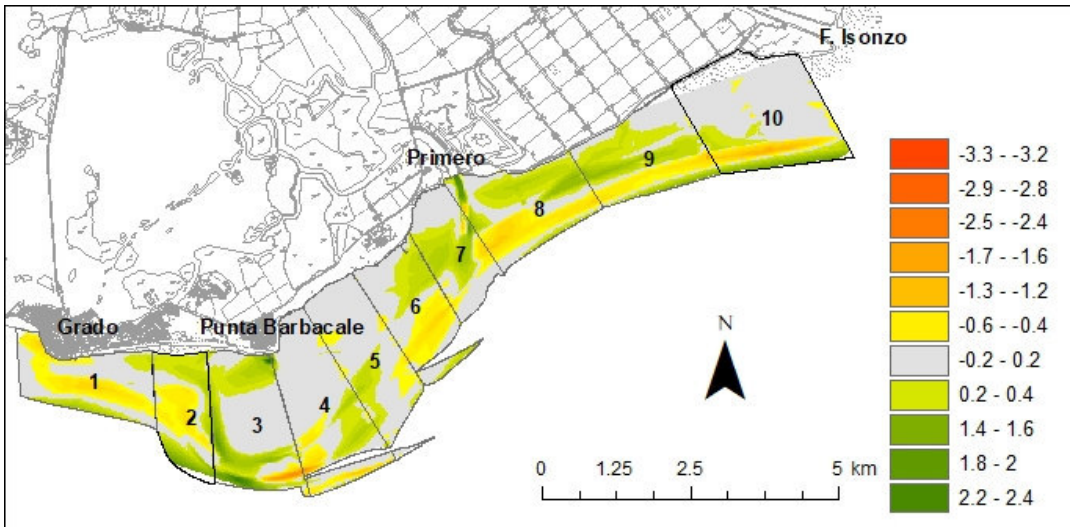


Figura 4.9 – Carta delle differenze altimetriche per il confronto 1968-1985.

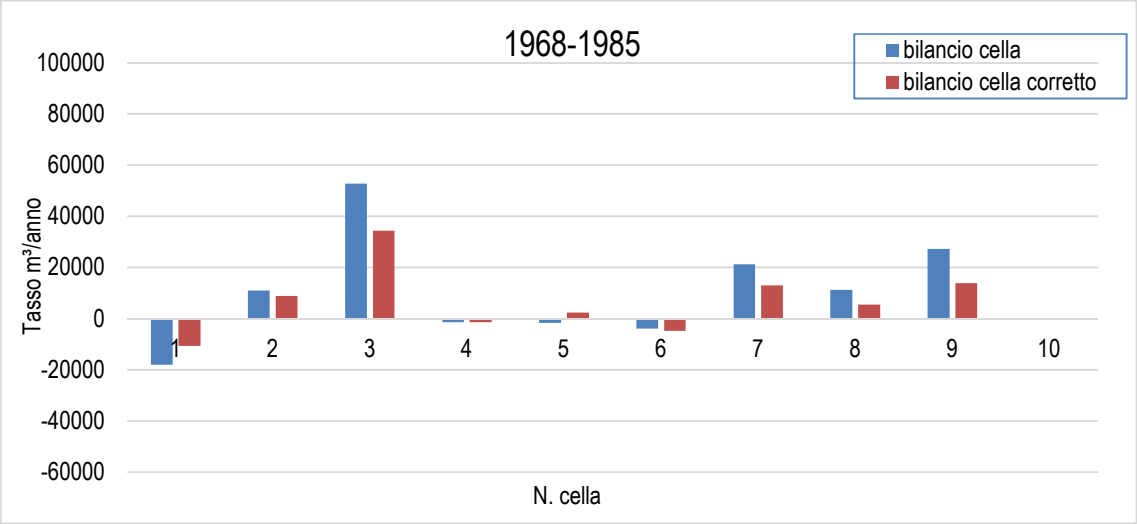


Figura 4.10 – Bilanci per cella ottenuti dal confronto 1968 – 1985, in "bilancio cella corretto" sono stati eliminate dal computo le differenze comprese entro l'intervallo -0.20 - 0.20 m.

Tabella 4.4 – Bilanci per cella ottenuti dalla carta delle differenze altimetriche per il periodo 1968 – 1985; la tabella riporta: i dati originali, i valori corretti eliminando dal computo le differenze comprese entro l'intervallo -0.20 - 0.20 m; l'entità dei volumi coinvolti nel medesimo intervallo ("scarto") e la percentuale che questi ultimi rappresentano rispetto al totale.

cella	1968-1985		corretto ±0.2m		scarto ±0.2m		%
	mc	mc/anno	mc	mc/anno	mc	mc/anno	
1	-306364	-18021	-179927	-10584	-126437	-7437	41,3
2	187126	11007	150654	8862	36471	2145	19,5
3	897569	52798	585700	34453	311869	18345	34,7
4	-22937	-1349	-22891	-1347	-46	-3	0,2
5	-27219	-1601	40758	2398	-67977	-3999	249,7
6	-66743	-3926	-81385	-4787	14642	861	-21,9
7	361321	21254	221294	13017	140027	8237	38,8
8	190625	11213	93380	5493	97245	5720	51,0
9	463412	27260	237199	13953	226213	13307	48,8
10	3522	207	-3900	-229	7423	437	210,7
TOT	1680312	98842	1040882	61228	639430	37614	

La sintesi è un netto accumulo occidentale e una traslazione del banco, causata da transito di materiale sedimentario. Il bilancio positivo lungo il tratto tra la foce Isonzo e il Primero testimonia il significativo apporto di sedimenti da parte del fiume, che transitano longshore e in gran parte by-passano il canale di Primero, producendo un accumulo dinamico e la migrazione del banco verso il promontorio di Grado. In 17 anni nell'apice occidentale del Banco (area in accumulo delle celle 2 e 3) si sono depositati ca. 740.000 m^3 di sedimenti, con un tasso medio di 43.000 m^3/anno.

L'area antistante il promontorio di Grado e la spiaggia Costa Azzurra (cella 1) risulta invece in bilancio negativo, a testimoniare che in questo periodo non vi è beneficio diretto determinato dal transito longshore del materiale sedimentario, che si intrappola poco prima.

Se si confrontano questi dati con l'analisi effettuata nello Studio Brambati (1985) si ottiene un trend paragonabile. L'Autore aveva infatti effettuato un bilancio basato sul confronto dei dati batimetrici del 1927 (rilievi dell'Istituto Idrografico della Marina, aggiornati al 1959 con riferimento presumibile al solo canale di Grado) e del 1985. Il tratto di litorale analizzato dall'Autore (Figura 4.11) è più esteso verso ovest rispetto alla nostra zona d'indagine (comprende una parte dei banchi esterni posti ad ovest della Bocca di Grado fino al banco d'Orio) e più ridotto invece a est (interessa una minima area a est di Punta Barbacale). Dai computi effettuati risultava un bilancio complessivo negativo per le tre aree considerate come riportato in Figura 4.11.

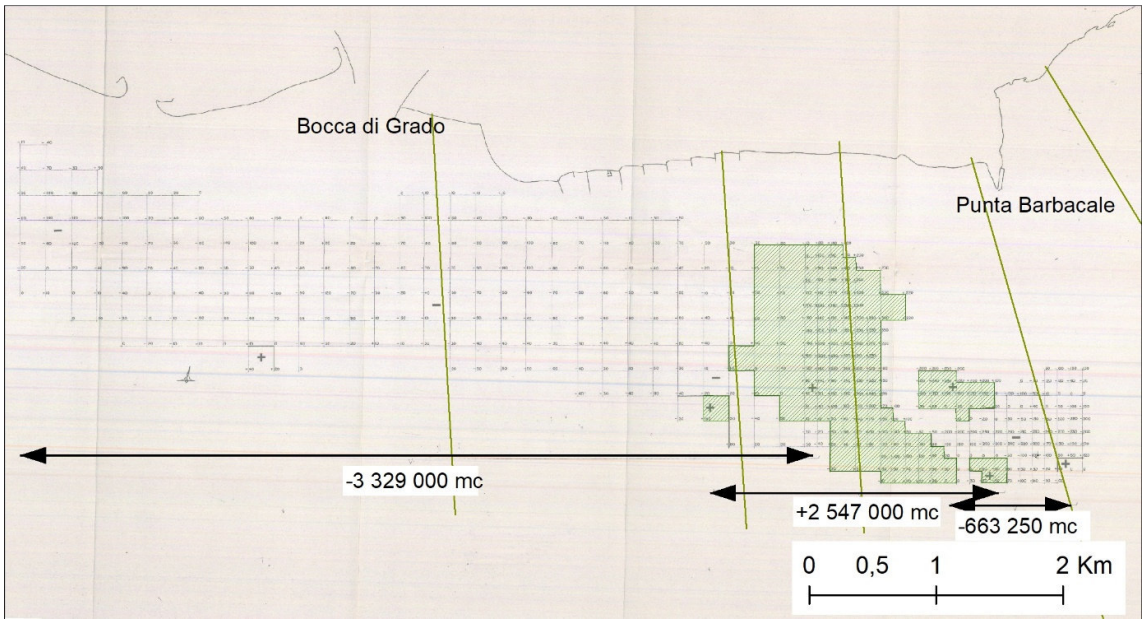


Figura 4.11 – Stralcio dell'allegato 3.13 dello Studio Brambati (1985), in cui sono riportati gli elementi grafici utilizzati per il calcolo del bilancio volumetrico. Con campitura in verde sono evidenziate le aree interessate da bilancio positivo. Per maggior chiarezza sono state inserite le tracce dei profili del 2007.

Come si può vedere, la tendenza evolutiva del litorale individuata da Brambati concorda con l'analisi qui effettuata e individua una forte area deposizionale nel settore occidentale del Banco.

Sebbene i due periodi siano diversi (1927-85 e 1968-1985) il trend deposizionale è praticamente identico, se si considera l'accumulo complessivo stimato da Brambati (2.547.000 m^3) distribuito nell'arco di 58 anni, pari a 44.000 m^3/anno circa. La costanza di questo aspetto evolutivo è confermata anche dalla costanza dei tassi di migrazione del limite occidentale del banco analizzata al paragrafo 3.3.

L'analisi di Brambati manca del settore orientale e le conclusioni alle quali giunge l'Autore sono quindi nettamente pessimistiche sullo stato e sul destino di questi litorali. Secondo Brambati dopo la migrazione della foce dell'Isonzo verso est si era creato un forte disequilibrio che sottraeva sedimenti al transito longshore verso i litorali gradesi.

➢ Periodo 1985-2007

Analogamente a quanto presentato per l'intervallo di tempo precedente in Figura 4.12, in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e in *Figura 4.13* sono riportati i risultati relativi all'analisi di bilancio realizzata per celle per il periodo 1985-2007. A differenza della coppia di anni precedente, le celle 10 e 9 risultano nettamente positive, ad indicare che in questo periodo vi è stato un apporto di sedimento notevolmente maggiore rispetto al precedente. Le celle 8, 7, 6 e 5 sono relativamente invariate e costituiscono un corridoio di transito del sedimento. A differenza del confronto precedente la cella 3, che prima era in accumulo, ora è in leggera erosione, e le celle 2 ed 1 sono nettamente in accumulo. Anche la cella 4 rappresenta un'area erosiva.

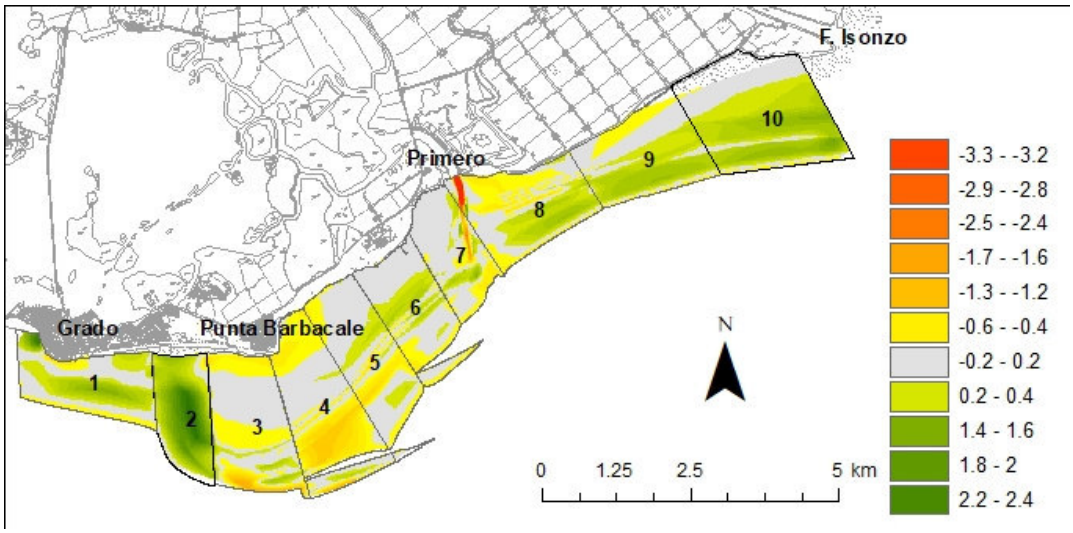


Figura 4.12 - Carta delle differenze altimetriche per il confronto 1985-2007.

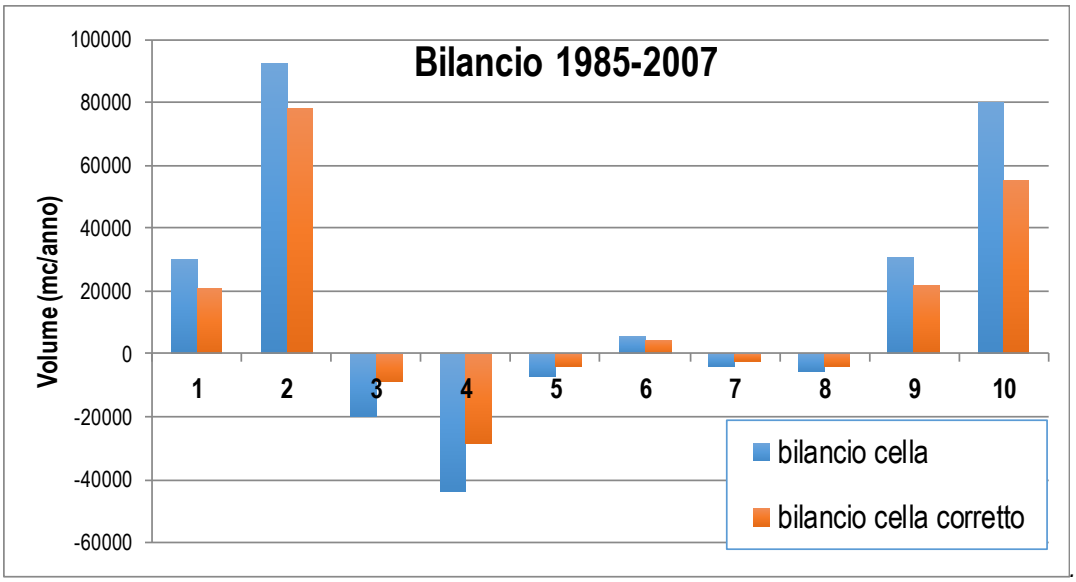


Figura 4.13 - Bilanci per cella ottenuti dal confronto 1985 – 2007, in "bilancio cella corretto" sono stati eliminate dal computo le differenze comprese entro l'intervallo -0.20 - 0.20 m.

Tabella 4.5 - Bilanci per cella ottenuti dalla carta delle differenze altimetriche per il periodo 1985 – 2007; la tabella riporta: i dati originali, i valori corretti eliminando dal computo le differenze comprese entro l'intervallo -0.20 - 0.20 m; l'entità dei volumi coinvolti nel medesimo intervallo ("scarto") e la percentuale che questi ultimi rappresentano rispetto al totale

	1985-2007		corretto ±0.2m		scarto ±0.2m		%
	mc	mc/anno	mc	mc/anno	mc	mc/anno	
1	661635	30074	457444	20793	204192	9281	30,9
2	2033127	92415	1724751	78398	308377	14017	15,2
3	-440038	-20002	-197646	-8984	-242392	-11018	55,1
4	-968948	-44043	-626366	-28471	-342583	-15572	35,4
5	-155703	-7077	-84736	-3852	-70967	-3226	45,6
6	118238	5374	93372	4244	24866	1130	21,0
7	-80362	-3653	-50363	-2289	-29999	-1364	37,3
8	-115684	-5258	-88423	-4019	-27262	-1239	23,6
9	671762	30535	479196	21782	192566	8753	28,7
10	1750161	79553	1215247	55239	534914	24314	30,6
TOT	3474189	157918	2922476	132840	551712	25078	

Il bilancio nettamente positivo a chiusura dell'unità fisiografica verso ovest, delinea un marcato apporto di sedimenti isontini, testimoniato altresì dall'importate accumulo nell'area del delta (celle 9-10). Parte del bilancio positivo dell'area di trappola posta all'estremità occidentale del banco (celle 1-2) è determinato da un processo di cannibalizzazione del banco (celle 3-4-5 in erosione per un totale di 900.000 m^3). Nel periodo in esame, l'area entro le celle 1-2 ha intrappolato complessivamente 2,18 milioni di metri cubi di sabbia. In termini di transito sedimentario netto, se non si considera il materiale cannibalizzato, il banco ha importato 1,27 milioni m^3 di sedimenti isontini, pari a un tasso di ca. 58.000 m^3/anno.

- Bilancio sedimentario complessivo - Periodo 1968-2007

La sommatoria dei dati delle celle è sempre positiva in entrambi i periodi e determina un valore di input sedimentario medio di 61.000 m^3/anno per il primo periodo, fino al 1985, e di 133.000 m^3/anno per il secondo, fino al 2007.

Le cifre risultanti sono molto elevate e certamente non si esclude che l'analisi possa essere affetta da errori determinati dalle semplificazioni geometriche nell'interpolazione spaziale. Ma rimane comunque evidente il netto beneficio determinato dagli apporti sedimentari isontini, che sembrano essersi raddoppiati nelle ultime due decadi. Sotto questo profilo sarà quanto mai necessario svolgere un'indagine più di dettaglio, anche per capire meglio le cause che possono determinare variazioni significative sui regimi idrologici.

Il quadro del periodo complessivo di indagine (1968-2007) presentato in *Figura 4.14*, in Tabella 4.6 e in Figura 4.15, evidenzia i due settori principali in cui si è avuto un bilancio positivo: il settore orientale, adiacente alla sorgente sedimentaria del fiume Isonzo (fronte deltizio occidentale), e il settore occidentale della Mula di Muggia, in parte alimentato dall'erosione dei fondali antistanti al Banco nel tratto compreso tra Primero e Punta Barbacale. Ciò che si nota è la presenza di una fascia di transito sedimentario entro i -5 m circa, nettamente alimentato dagli apporti del fiume Isonzo, che veicola i sedimenti nell'area di trappola, ubicata sul limite occidentale del banco della Mula di Muggia. In 39 anni il bilancio sedimentario del litorale ammonta a 4,83 milioni di m^3 (tasso pari a 124.000 m^3/anno). Il banco in senso stretto ha

intrappolato oltre 3 milioni di m^3 (celle 1-2-3), di cui quasi 800.000 dalla cannibalizzazione parziale della porzione posta ad est di Punta Barbacale (celle 4 e 5) avvenuta negli ultimi 20 anni di confronto.

Le ragioni di questo trend di accumulo significativamente in crescita andranno appurate attraverso indagini specifiche, in particolare con una ricognizione specifica sullo stato attuale della morfologia del Banco e dei litorali adiacenti. L'ipotesi di lavoro è che all'incremento del livello marino che causa la traslazione verso terra del Banco, si associ una sensibile modificazione del regime idrologico del fiume Isonzo. La percezione è che il fiume abbia modificato il potenziale di carico solido nel corso degli ultimi due-tre decenni, incrementando gli apporti di sedimento alla foce a causa del cambio di regime meteo-climatico. Il maggior potenziale erosivo e quindi il maggior accumulo di sedimenti potrebbe, infatti, essere determinato da una maggiore "siccità" estiva e successiva maggiore intensità delle precipitazioni tardo-autunnali/invernali. Una piovosità di fatto più efficace in termini erosivi poiché le precipitazioni sono concentrate nel tempo, e intervengono dopo fasi secche che predispongono i terreni a una maggiore vulnerabilità.

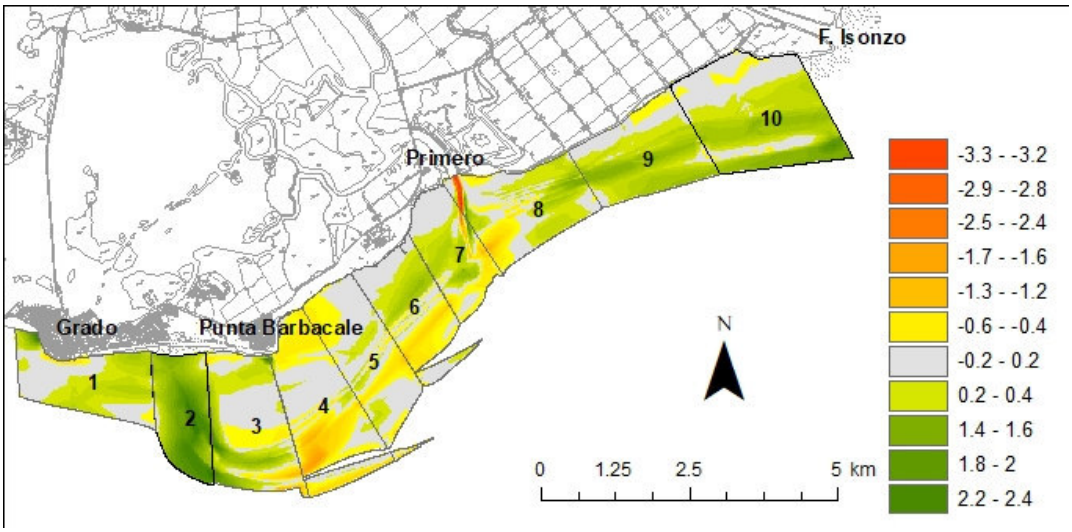


Figura 4.14 - Carta delle differenze altimetriche per il confronto 1968-2007.

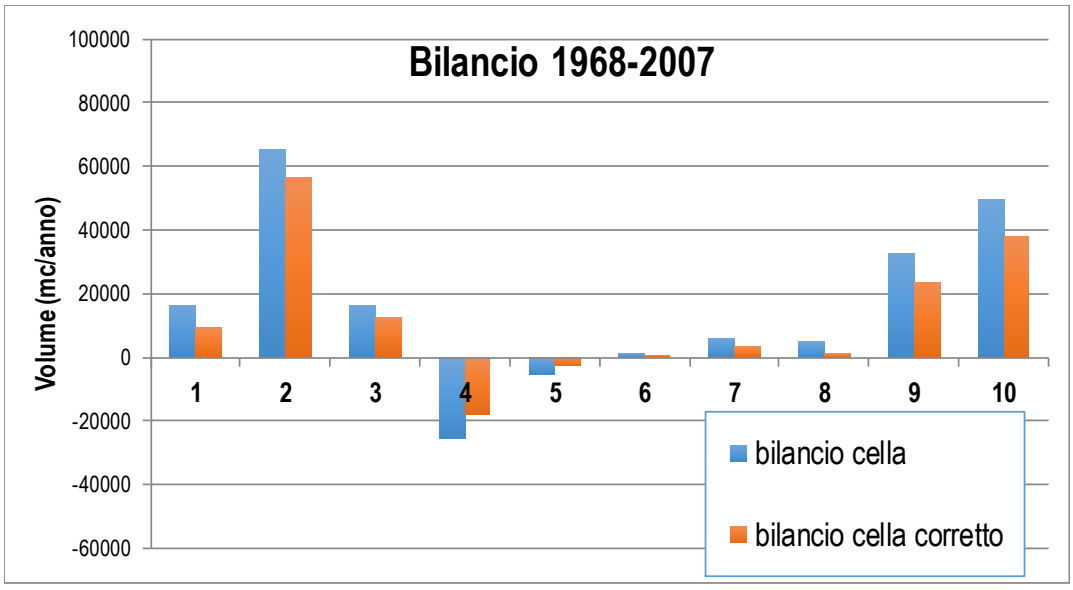


Figura 4.15 - Bilanci per cella ottenuti dal confronto 1985 – 2007, in "bilancio cella corretto" sono stati eliminate dal computo le differenze comprese entro l'intervallo -0.20 - 0.20 m.

Tabella 4.6 - Bilanci per cella ottenuti dalla carta delle differenze altimetriche per il periodo 1968 – 2007; la tabella riporta: i dati originali, i valori corretti eliminando dal computo le differenze comprese entro l'intervallo -0.20 - 0.20 m; l'entità dei volumi coinvolti nel medesimo intervallo ("scarto") e la percentuale che questi ultimi rappresentano rispetto al totale.

	1968-2007		corretto ±0.2m		scarto ±0.2m		%
	mc	mc/anno	mc	mc/anno	mc	mc/anno	
1	631766	16199	353487	9064	278279	7135	44,0
2	2545641	65273	2205148	56542	340493	8731	13,4
3	641609	16452	493796	12661	147813	3790	23,0
4	-1000159	-25645	-686468	-17602	-313690	-8043	31,4
5	-207899	-5331	-112383	-2882	-95516	-2449	45,9
6	39620	1016	18052	463	21568	553	54,4
7	244155	6260	129209	3313	114947	2947	47,1
8	191201	4903	49498	1269	141702	3633	74,1
9	1283283	32905	911198	23364	372085	9541	29,0
10	1933333	49573	1484632	38067	448701	11505	23,2
TOT	6302551	161604	4846169	124261	1456382	37343	

5. Conclusioni

5.1. Considerazioni conclusive sull'evoluzione del litorale e sul bilancio sedimentario

I litorali di Grado compresi tra la bocca di porto omonima e la foce dell'Isonzo sono caratterizzati dalla presenza verso mare di un vasto sistema di barre sabbiose semi-sommerse noto come Banco della Mula di Muggia che rappresenta da sempre una preziosa risorsa ambientale ed economica. La naturale conformazione e il dinamismo di questo sistema comportano cambiamenti dell'assetto costiero non sempre ideali per la fruizione turistica.

Allo scopo di sviluppare un'adeguata base conoscitiva scientifica che potesse fungere nel futuro da base per una corretta programmazione e pianificazione costiera, l'Università degli Studi di Trieste e la Regione Friuli Venezia Giulia hanno sviluppato un'attività di raccolta dei dati esistenti e di analisi su questi litorali.

Sul litorale in oggetto esiste una discreta quantità di dati pregressi in termini di cartografia storica, rilievi topo-batimetrici e foto aree, ma il materiale disponibile risulta spesso frammentato, difficilmente reperibile e in formati non utilizzabili per le analisi in ambiente digitale.

Il primo passo di questo lavoro è stato quindi la raccolta, il riordino e la lettura in chiave critica del materiale disponibile e la digitalizzazione di quello ritenuto utile e/o adeguato agli scopi del presente lavoro. Nonostante la mole di dati raccolta questa fase del lavoro probabilmente non può ritenersi ad oggi del tutto esaustiva, ma la banca dati creata rappresenta una base coerente, direttamente utilizzabile e aggiornabile.

La rilettura in chiave critica dei dati disponibili e le analisi geomorfologiche eseguite in ambiente GIS hanno consentito in primo luogo di tracciare un quadro completo dell'evoluzione dei litorali dal 1800 alla data dell'ultima foto aerea disponibile (2014).

La cartografia disponibile dal 1822 al 1936 ha permesso, pur con alcuni limiti, di identificare e descrivere i principali elementi di rilievo, sia rispetto agli aspetti geomorfologici e sia a quelli di modificazione del territorio. Si è giunti così a ricostruire forma, posizione e caratteristiche del Banco della Mula di Muggia, del canale di Primero e della foce dell'Isonzo.

A partire dal 1954 la disponibilità di foto aree ha permesso di dare una maggior precisione e un miglior connotato morfodinamico agli elementi individuati, anche grazie al supporto di alcune levate batimetriche su sezione che hanno interessato tutto il litorale. Si è giunti così alla redazione di 4 cartografie geomorfologiche relative ad altrettanti anni: 1954, 1978, 2007 e 2014. Il riconoscimento delle forme analoghe in anni diversi ha permesso di capire l'evoluzione del Banco della Mula di Muggia e dei litorali adiacenti.

Nelle prime fasi dell'analisi storica eseguita il Banco della Mula di Muggia rappresenta una struttura di spit probabilmente solo parzialmente emerso, in continuità con i bassi fondali sviluppati sull'ala destra del delta dell'Isonzo. A partire dal 1870 circa il regime del litorale venne profondamente modificato da una nuova apertura verso mare del canale di Primero e a partire da quel momento inizia la storia "moderna" del banco e incomincia una rapida e costante migrazione verso occidente, nel verso della deriva longshore prevalente. Nello stesso tempo erosioni non quantificabili con i dati a disposizione possono essersi verificate con asporto delle parti più elevate, anche se l'avvicendamento delle barre mostra tutt'oggi l'esistenza di una vasta struttura dissipativa.

La migrazione del bordo occidentale venne accompagnata soprattutto nelle prime fasi da una forte tendenza da parte della porzione orientale del Banco a migrare verso terra, tendendo a colmare in parte l'area di retrobanco; questa tendenza si è esaurita nel tempo e sembra essere quasi annullata a partire dagli anni 60. Contemporaneamente infatti si assiste alla costruzione di una struttura di delta di riflusso in corrispondenza del nuovo canale di Primero: il lobo terminale del delta funge da corridoio di by pass

per i sedimenti che dall'Isonzo si muovono verso occidente. Il forte transito sedimentario è evidenziato anche dalla presenza a partire dal 1978 circa a 3-4 m di profondità di strutture morfologiche particolari dette *finger bars*, dune subacquee indicatrici di elevata disponibilità di sedimenti. La disponibilità di sedimento di origine isontina è testimoniata inoltre anche dal progressivo ampliamento del sistema di barre (shoreface a barre) in destra della foce del fiume.

Entrambi i sistemi di barriera (Banco Mula di Muggia e Banchi del delta dell'Isonzo) mostrano una fascia di transito sedimentario entro i 3m di profondità caratterizzata da barre fortemente allungate che tendono a migrare da est verso ovest, ma anche a subire episodi di minore entità di migrazione verso l'entroterra in occasione di eventi a più alta energia. Le barre più interne mostrano in generale un processo di stabilizzazione con progressiva colonizzazione da parte delle fanerogame marine.

La presenza di un sistema di barriere anche se intertidali fa sì che le spiagge utilizzate a scopo turistico siano isolate dalla normale dinamica del moto ondoso, il che le rende di fatto degli ambienti di retro-banco anziché di spiaggia propriamente detta. Sono conseguenti caratteristiche una morfologia molto piatta, la presenza di sedimenti fini, fondali antistanti molto bassi e colonizzati da fanerogame marine o da mat algali. Si tratta di una situazione che per il tratto compreso tra la località la Rotta e la bocca di Primero perdura almeno da 200 anni, mentre appare essersi rafforzata in epoca più recente (circa 30 anni) per la porzione orientale (da Primero alla foce dell'Isonzo). A occidente della Rotta l'avanzamento delle propaggini occidentali del Banco ha progressivamente aumentato l'estensione di spiaggia protetta in corrispondenza della spiaggia principale di Grado, arrivando a interessare una lunghezza di 800 m.

A partire dalle sezioni batimetriche delle coppie di anni 1968-2007 e di quelle del 1978-1985 meno affidabili a causa della qualità del dato di partenza, sono state eseguite le analisi dei volumi di sedimento persi e guadagnati nel tempo. I risultati confermano le risultanze delle analisi delle foto aeree e indicano nel complesso un bilancio ampiamente positivo per il litorale.

Infine, i risultati del confronto (differenza altimetrica) dei modelli tridimensionali del terreno (DTM) basati sugli stessi dati batimetrici (effettuati per i periodi 1968-1985, 1985-2007) e per il complessivo 1968-2007 evidenziano spazialmente i settori con un bilancio positivo quali quelli adiacenti alla sorgente sedimentaria del fiume Isonzo e il settore occidentale della Mula di Muggia. Quest'ultimo risulta alimentato solo in parte dall'erosione dei fondali antistanti al Banco nel tratto compreso tra Primero e Punta Barbacale.

I dati confermano la presenza di una fascia di transito sedimentario tra -2 m e -5 m circa, nettamente alimentato dagli apporti del fiume Isonzo, che veicola i sedimenti nell'area di trappola, posta al limite occidentale del banco della Mula di Muggia. In 39 anni il bilancio sedimentario del banco è nettamente positivo, pari a oltre 4 milioni di metri cubi di sabbia pari a un tasso di 124.000m^3 all'anno. Un bilancio positivo di quest'entità è estremamente rilevante ed evidenzia un netto beneficio determinato dagli apporti isontini, pur non potendo escludere errori legati alla semplificazione spaziale indotta anche dalla limitata disponibilità di dati.

Situazioni di questo tipo non sono comuni e vanno ritenute estremamente positive soprattutto nell'ottica dell'innalzamento del livello marino in atto, nei confronti del quale la capacità di resilienza dei sistemi costieri è anche legata alla disponibilità di sedimenti.

5.2. **Implementazione futura dei dati**

L'analisi sin qui svolta ha messo in evidenza l'entità e la qualità di dati pregressi su questo comparto costiero, evidenziandone nello steso tempo, laddove necessario, le carenze.

Si ritiene che sia necessario effettuare un'implementazione dei dati a oggi disponibili per l'area prima di procedere con la ricerca di eventuali soluzioni o adattamenti ai cambiamenti in atto.

Va in primo luogo evidenziato lo scarso aggiornamento dei dati disponibili: gli ultimi rilievi topo - batimetrici sono infatti del 2007 e non fanno parte di un monitoraggio istituzionale dell'area bensì sono stati svolti a puro scopo di ricerca scientifica nell'ambito di un progetto di ricerca nazionale (Progetto V.E.C.T.O.R.). L'ultimo monitoraggio istituzionale dell'area è stato finanziato dalla regione Autonoma Friuli Venezia Giulia nel 1985.

Si elenca qui di seguito brevemente una proposta di implementazione dei dati che possa fungere in maniera adeguata quale base conoscitiva per l'area:

- Rilievo topo - batimetrico dell'area su sezioni: le stesse dovranno essere portate fino a profondità sufficiente da coprire tutti i fondali soggetti a modificazioni (8-10m), realizzate in modo da coincidere con quelle realizzate in precedenza (in particolare quelle del 1968 e del 2007) ma aggiungendo delle sezioni intermedie in modo da migliorare il dettaglio di rilievo e consentire la costruzione di DTM più precisi.
- Rilievi post mareggiata per offrire la possibilità di indagare le conseguenze degli eventi a più alta energia
- Acquisizione di dati anemometrici, ondametrici e mareografici e l'applicazione di modelli di generazione del moto ondoso al largo e propagazione sottocosta.

Un capitolo più ampio si aprirebbe inoltre volendo indagare gli aspetti legati al bilancio sedimentario soprattutto in termini di portata dei fiumi. È infatti determinante per una corretta pianificazione futura degli interventi nel comparto costiero, anche nell'ottica del cambiamento climatico in atto, conoscere l'entità del carico solido dei fiumi e la sua variazione nel tempo, le modificazioni avvenute a livello di bacini idrografici e la loro possibile influenza sulla erodibilità dei suoli e sul trasporto sedimentario

Bibliografia

BRAMBATI A., 1983. Modificazioni costiere nell'arco lagunare dell'Adriatico settentrionale. *Antichità Altoadriatiche (Studi Jesolani),* 27: 13-47.

BRAMBATI A. & MAROCCO R., 1982. Criteri di intervento per migliorare la circolazione delle acque e per il ripascimento della spiaggia artificiale di Punta Barbacale (Grado-Adriatico Settentrionale*). Boll. Soc. Adr. Sc*., LXVI, 5-15.

BRAMBATI A., CATANI G., LENARDON G., MAROCCO R., 1982*. Rilievi sul litorale da Monfalcone alla foce dell'Adige*. Consiglio Nazionale Delle Ricerche, Progetto Finalizzato Conservazione del Suolo, Sottoprogetto Dinamica dei Litorale Area Campione Alto Adriatico. Pubblicazione n°170. 15 pp, 52 tavv..

BRAMBATI A., CIABATTI M., FANZUTTI G.P., MARABINI F., MAROCCO R. 1988. Carta sedimentologica dell'Adriatico settentrionale. CNR. Istituto Geografico De Agostini.

CERC (Coastal Engineering Research Center), 1984. *Shore protection manual*. US Army Corps of Engineers, Washington.

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.

DE GRASSI P. & DE GRASSI V., 1957. *Memoria sulle variazioni morfologiche dei litorali marini della laguna di Grado*. A cura dell'azienda autonoma di Soggiorno – Grado, 54 p.

DESIO A., 1922. Le variazioni della foce del fiume Isonzo. *Rivista geografica italiana*, Anno XXIX, Fasc X-XI-XII: 18-268.

FAVRETTO A., LAGO L., MAURO G. 2004. Telerilevamento e GIS per lo studio dell'assetto costiero nell'Alto Adriatico. Il caso dell'isola di Grado attraverso cartografia storica, digitale e immagini satellitari. *L'Universo*, 3: 353-361.

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., BEZZI A., MARTINUCCI D., PILLON S., POPESSO C., 2014. *Geodatabase gestionale delle coste venete*. Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Matematica e Geoscienze, 184p.

FONTOLAN G., BEZZI A., MARTINUCCI D., PILLON S., POPESSO C., RIZZETTO F. 2015. Sediment budget and management of the Veneto beaches, Italy: an application of the modified Littoral Cells Management System (SICELL). *Coastal and Maritime Mediterranean Conference CM2, Ferrara 25-27 November 2015*. Editions Paralia online, http://dx.doi.org/10.5150/cmcm.2015.010: 47-50.

FONTOLAN G. & PILLON S, 2015. L'innalzamento del livello del mare e le aree costiere. In (a cura di Fontolan G.) Studio corredato da cartografia e relazione di sintesi geologica e geotematica sullo stato di fatto concernente la conoscenza d'insieme del territorio fisico regionale per la valutazione degli impatti dovuti ai cambiamenti climatici. Regione Friuli Venezia Giulia.

FONTOLAN G., PETTI M., BEZZI A., BOSA S., LUBRANO F., MARTINUCCI D., PASCOLO S., PILLON S., POPESSO C., SPONZA S., ULLIANI A., 2017. *Studio di assetto morfologico ambientale della laguna di Marano e Grado*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione Centrale alle Infrastrutture, Mobilità, Pianificazione Territoriale, Lavori Pubblici e Università. Relazione finale.

GATTO F. & MAROCCO R., 1992. Caratteri morfologici ed antropici della Laguna di Grado (Alto Adriatico). *Gortania, Atti Museo Friulano di Storia Naturale*, 14: 19-42.

GORDINI E., CARESSA S., MAROCCO R., 2003**.** Nuova carta morfo-sedimentologica del Golfo di Trieste (Da Punta Tagliamento alla foce dell'Isonzo). *Gortania*, *Atti Museo Friul. di Storia Nat.*, 5-29.

MAROCCO R., 1989. Lineamenti geomorfologici della costa e dei fondali del Golfo di Trieste e considerazioni sulla loro evoluzione tardo-quaternaria. *International Journal of Speleology*, 18, 3-4, 87-110.

MAROCCO R., 2000. Le spiagge di Grado: situazione attuale, tendenze evolutive ed ipotesi d'intervento per il risanamento degli arenili. *Gortania, Atti Museo Friulano di Storia Naturale*, 22: 5-37.

MAROCCO R., 2009. Prima ricostruzione paleo-idrografica del territorio della bassa pianura friulano-isontina e della laguna di Grado nell'Olocene. *Gortania*, Geologia, Paleontologia, Paletnologia, 31: 69 - 86.

MAROCCO R., 2010. Foce dell'Isonzo e isola della Cona. In (a cura di Cucchi F., Finocchiaro F. Muscio G.). *Geositi del Friuli Venezia Giulia:* 306-307.

MAROCCO R. & FIGUS B., 2010. Banchi sommersi della Mula di Muggia, Trezza Grande e Trezza Piccola. In (a cura di Cucchi F., Finocchiaro F., Muscio G.). *Geositi del Friuli Venezia Giulia:* 304 - 305.

MOLNAR G. & TIMAR G. 2009. Mosaicking of the 1:75 000 sheets of the third military survey of the Habsburg Empire. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 44: 115-120.

NICHOLS, G. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*, Second Edition. Oxford: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. 419 pp.

PROTEZIONE CIVILE REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 2005. *Indagine sullo stato degli argini della bassa pianura tra le foci del Tagliamento e del Timavo, con particolare riferimento all'arco lagunare*. Trieste: 117pp.

PROTEZIONE CIVILE REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 2010. *Primi interventi di protezione civile in relazione al rischio di ingressione marina nelle aree costiere del Friuli Venezia Giulia e di esposizione al rischio della popolazione rispetto ad un evento meteo-marino estremo*. http://www.protezionecivile.fvg.it/getDoc.php?file=48744/Rischio%20laguna_GB_2010_giornali.pdf

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 1978. *Studio dell'assetto fluviale e costiero della Regione Friuli-Venezia Giulia*. Rapporto Preliminare. Sezione Seconda: Parte Costiera. Relazione ed Allegati. *ELC- Milano, Studio Volta*- Savona, 161 pp.

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, 1985. *Studio sedimentologico e marittimo costiero dei litorali del Friuli Venezia Giulia, ipotesi di intervento per il recupero ambientale e la valorizzazione della fascia costiera. A cura di A. Brambati. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione Regionale dei lavori Pubblici, Servizio dell'Idraulica, Trieste: 67 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.

TIMAR G., MOLNAR G., SZÉKELY B., BISZAK S., VARGA J. JANKO A., 2006. *Digitized maps of the Habsburg Empire. The map sheets of the second military survey and their georeferenced version*. Arcanum, Budapest, 59 pp.

TRINCARDI F., CORREGGIARI A., CATTANEO A, REMIA A., TAVIANI M, ANGELETTI L., FOGLINI F., CAMPIANI E., 2011. *Carta geologica dei mari italiani alla scala 1:250.000 Foglio NL 33- Venezia.* ISPRA.

TROBEC A., BUSETTI M., ZGUR F., BARADELLO L., BABICH A., COVA A., GORDINI E., ROMEO R., TOMINI I., POGLAJEN S., DIVIACCO P., VRABEC M., 2017. Thickness of marine Holocene sediment in

the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea). Earth Syst. Sci. Data Discuss., https://doi.org/10.5194/essd-2017-135, in review, 2017.

VARANI L. & ZUNICA M., 1974. *Documenti cartografici per l'interpretazione del regime litoraneo tra l'Isonzo e il Foglia*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Programma speciale per la conservazione del suolo, Rapp. Tecnico 1: 47pp.

Siti web consultati:

http://www.ispravenezia.it

http://cfs.ncep.noaa.gov

http://www.erdc.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Article/476716/steady-state-spectral-wave/https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel_data_access

http://intelspeedcontest2006.tiscali.it/voli/.

http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/

https://it.bing.com/maps/

https://earthengine.google.com/timelapse/