

# Studi costieri

Dinamica e difesa dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

N. 2  
2000

**La Sacca di Goro**

A cura di  
Umberto Simeoni



# Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Collana diretta da:

**Enzo Pranzini**

Dipartimento di Scienze della Terra

Via J. Nardi 2 - 50132 Firenze

Tel. 055 243486 - Fax 055 241595

E-mail epranzini@cesit1.unifi.it

## Comitato scientifico

Segreteria: **Pierluigi Aminti**

Dipartimento di Ingegneria civile

Via S. Marta 3 - 50139 Firenze

Tel. 055 4796224 - Fax 055 495333

E-mail aminti@dicea.unifi.it

**Carlo Bartolini** - Firenze

**Edoardo Benassai** - Napoli

**Paolo Boccotti** - Reggio Calabria

**Antonio Brambati** - Trieste

**Leandro D'Alessandro** - Chieti

**Giuliano Fierro** - Genova

**Giovanni Battista La Monica** - Roma

**Alberto Lamberti** - Bologna

**Gianfranco Liberatore** - Udine

**Elvidio Lupia Palmieri** - Roma

**Giuseppe Matteotti** - Padova

**Alberto Noli** - Roma

**Arturo Ragone** - Napoli

**Giulio Scarsi** - Genova

**Umberto Simeoni** - Ferrara

**Sandro Stura** - Genova

**Ugo Tomasicchio** - Bari

**Adalberto Vallega** - Genova

**Marcello Zunica** - Padova

## Editore

**Lito Terrazzi s.r.l.**

Via Guido Rossa, 9

Cascine del Riccio

50015 Impruneta (Firenze)

# Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

## Numero 2

### La Sacca di Goro

A cura di  
Umberto Simeoni

<b>Presentazione</b>	pag.	1-4
<b>Morfogenesi ed evoluzione dello Scanno di Goro (Delta del Po)</b> Umberto Simeoni, Renzo Dal Cin, Giorgio Fontolan e Umberto Tessari	pag.	5-20
<b>Evoluzione dell'area di foce del Po di Goro</b> Carlo Del Grande e Umberto Tessari	pag.	21-29
<b>Un bacile di nome Delta</b> Umberto Simeoni, Giovanni Gabbianelli, Umberto Tessari, Giovanni Calderoni e Carlo Del Grande	pag.	31-44
<b>Evoluzione dell'area di Goro negli ultimi cinque secoli (Delta del Po)</b> Giovanni Gabbianelli, Carlo Del Grande, Umberto Simeoni, Andrea Zamariolo e Giovanni Calderoni	pag.	45-63
<b>Stratigrafia dei depositi recenti della Sacca di Goro</b> Giorgio Fontolan, Stefano Covelli, Annelore Bezzi, Virginie Tesolin e Umberto Simeoni	pag.	65-79
<b>Aspetti geochimici dei sedimenti della Sacca di Goro (Delta del Po, Adriatico settentrionale)</b> Stefano Covelli, Giorgio Fontolan, Loris Sartore, Umberto Simeoni, Virginie Tesolin e Andrea Zamariolo	pag.	81-103
<b>Analisi della circolazione idrica nella Sacca di Goro mediante modello matematico</b> Armando Brath, Marco Gonella, Paolo Polo e Massimo Tondello	pag.	105-122
<b>Morfodinamica delle bocche lagunari della Sacca di Goro</b> Umberto Simeoni, Giorgio Fontolan e Paolo Ciavola	pag.	123-138
<b>Dinamica sedimentaria dell'area di Goro (Delta del Po)</b> Umberto Simeoni, Giorgio Fontolan, Renzo Dal Cin, Giovanni Calderoni e Andrea Zamariolo	pag.	139-151
<b>Contributo alla conoscenza del clima meteomarinario della Sacca di Goro: misure correntometriche e mareografiche</b> Paolo Ciavola, Marco Gonella, Umberto Tessari e Andrea Zamariolo	pag.	153-173
<b>Caratterizzazione della morfologia di spiaggia lungo lo Scanno di Goro tramite tecniche GPS e rilievi batimetrici</b> Paolo Ciavola, Marco Gatti, Umberto Tessari, Andrea Zamariolo e Carlo Del Grande	pag.	175-188
<b>Caratteri geochimici dei depositi attuali della Sacca di Goro (Delta del Po)</b> Enrico Dinelli, Giovanni Gabbianelli e Umberto Tessari	pag.	
<b>I foraminiferi bentonici della Sacca di Goro (Italia) e la loro possibile utilizzazione come bioindicatori dell'inquinamento da metalli pesanti</b> Rodolfo Coccioni	pag.	199-215
<b>Risposta delle comunità lagunari ad un evento di disturbo</b> Elisa Anna Fano, Giuseppe Castaldelli, Michele Mistri, Giorgio Rossi e Remigio Rossi	pag.	217-231
<b>L'ambiente della Sacca di Goro: suo inserimento nel Parco del Delta e sue problematiche ambientali</b> Gaetano Mazzeo	pag.	233-239



ISSN 1129-8588

## Presentazione

Non è facile spiegare a chi non conosce la realtà gorese che quando si parla di Sacca di Goro, non si parla semplicemente di una parte del territorio comunale ma si sta parlando di un aspetto ecologico, economico e sociale di primaria importanza per la collettività locale. In un paese di 4600 abitanti, circa 1000 si dedicano alla pesca ed altre diverse centinaia sono occupati nell'indotto. Sono numeri che da soli spiegano diversi motivi dell'importanza della laguna: la Sacca è la "fabbrica di Goro", ma non soltanto questo.

Dal punto di vista naturalistico l'ecosistema della Sacca assume fondamentale rilievo nel contesto dell'intero Delta, conservando, in parte, molte di quelle tracce che spiegano l'evoluzione morfologica di questo territorio, nato, in buona sostanza, dopo l'intervento antropico del Taglio di Porto Viro, nel 1604. Da sempre la popolazione Gorese ha vissuto in simbiosi con questo ecosistema, praticando una serie di attività legate fondamentalmente alla pesca, ma anche alla caccia, alla raccolta della gracilaria (plon) ed al taglio del fragmiteto: attività che hanno rappresentato per generazioni, fonti di sostentamento irrinunciabili per la popolazione locale.

Dal 1985, quando iniziò la sperimentazione delle vongole "*Tapes philippinarum*", la vocazione di questa laguna si è progressivamente orientata verso l'allevamento di questa specie che ha saputo dare delle risposte economiche di un certo interesse, portando nella Sacca anche una parte di marineria, che si era sempre occupata di pesca d'altura o addirittura chi pescatore non lo era mai stato.

Una serie di sfortunate vicende ha fatto sì che proprio in quegli anni si accentuasse un fenomeno di scarsa idrodinamicità e quindi di scarsa ossigenazione di alcune zone della laguna, a causa dei detriti fluviali, che le correnti marine avevano concentrato all'estremità ovest dello Scannone, andando ad occludere l'unica bocca di ricambio idrico della Sacca.

La diminuita efficienza idrica comporta un maggior ristagno degli scarichi del Po di Volano e del Canal Bianco che si immettono direttamente nella Sacca, con un aumento esponenziale di fosforo ed azoto, fonte di alimentazione delle macroalghe, che in lunghi periodi infestano la Sacca, prima fra tutte l'ormai celebre "Ulva rigida".

La morte e la putrefazione dell'ulva comporta uno stravolgimento dell'intero ecosistema della Sacca, perché alla moria delle vongole, parallelamente si assiste alla fuga di ogni specie ittica, con conseguente interruzione della catena alimentare, e danni anche per l'avifauna ittiofaga.

Questo lungo discorso ha lo scopo di sottolineare l'indissolubile rapporto fra salvaguardia ambientale e promozione economica dal punto di vista ittico, perché non vi è dubbio che il rilancio della seconda non può avvenire senza la rivalutazione della prima.

Qualsiasi intervento, ormai, rivolto al ripristino dell'ambiente vallivo che vada nell'indirizzo dell'aumento dell'idrodinamicità ed una diminuzione dei nutrienti, avrebbe conseguenze benefiche su tutte le specie ittiche, come ampiamente dimostrato dagli studi.

E' mia personale opinione che il traguardo non sarà irraggiungibile, ma che un sereno confronto fra i risultati degli studi scientifici ed il bagaglio d'esperienze maturate da generazioni di pescatori, possano indicare il cammino per quegli interventi necessari al recupero dell'intero ecosistema vallivo.

**Rino Conventi**  
Sindaco di Goro

## Il Parco Regionale del Delta del Po

La creazione della rete "Natura 2000" costituisce il perno della politica comunitaria per la conservazione della natura e una sfida importante per gli Stati membri.

Le direttive "uccelli" (79/409/CEE) e "habitat" (92/43/CEE) sono ormai vincolanti per la pianificazione territoriale delle Regioni che abbiano individuato parchi, aree protette, riserve e il D.P.R. n°357/1998 stabilisce i criteri con cui gli Enti di Gestione devono garantire, nei territori di loro competenza, la conservazione dei S.I.C. (Siti di interesse comunitario) dove sono riscontrate presenze di flora e fauna rare e dove l'habitat creatosi risulta interessante e strategico per la conservazione di specie animali e vegetali.

A tal fine sono stati individuati, con Direttiva "Habitat" 92/43/CEE, i seguenti S.I.C., in quanto zone umide costiere adriatiche maggiormente "dotate" di biodiversità: Sacca di Goro, Po di Goro, Valle Dindona, foce del po di Volano per un totale di 4.387 ha.

La Sacca di Goro, in particolare, contiene i seguenti habitat:

- acque marine inferiori ai sei metri a bassa marea, baie e stretti;
- letti acquatici marini subtidali, praterie marine;
- spiagge sabbiose, barre sabbiose, isole sabbiose, sistemi dunosi;
- estuari;
- fanghi, sabbie o piane salate intertidali;
- paludi intertidali, paludi salate, prati salmastri, paludi intertidali dolci o salmastre;
- lagune costiere salate o salmastre in contatto con il mare;
- lagune costiere dolci, lagune dolci dei delta

In particolare, la dotazione biologica, messa in luce dagli studi del Dott. M. Costa e Dott. M. Pelizzari in collaborazione con il Parco del Delta, risulta la seguente:

Specie vegetali Allegato II Direttiva 92/43/CEE: *Salicornia veneta*.

Specie animali Allegato II Direttiva 92/43/CEE: *Emys orbicularis*, *Caretta caretta*, *Petromyzon marinus*, *Acipenser naccari*, *Acipenser sturio*, *Alosa fallax*, *Aphanius fasciatus*, *Pomatoschistus canestrini*, *Knipowitschia panizzae*.

Specie animali Allegato IV Direttiva 92/43/CEE: *Elaphe longissima*, *Podarcis sicula*.

Specie di Uccelli Allegato I Direttiva 79/409/CEE: *Gavia stellata*, *Gavia arctica*, *Botaurus stellaris*, *Ixobrychus minutus*, *Nycticorax nycticorax*, *Ardeola ralloides*, *Egretta garzetta*, *Egretta alba*, *Ardea purpurea*, *Milvus migrans*, *Circus aeruginosus*, *Circus cyaneus*, *Circus pygargus*, *Pandion haliaetus*, *Himantopus himantopus*, *Recurvirostra avosetta*, *Philomachus pugnax*, *Limosa lapponica*, *Tringa glareola*, *Larus melanocephalus*, *Larus genei*, *Gelchelidon nilotica*, *Sterna sandvicensis*, *Sterna hirundo*, *Sterna albifrons*, *Cblidonias hybridus*, *Cblidonias niger*, *Alcedo atthis*, *Acrocephalus melanopogon*.

Per questa ricchissima presenza di fauna e flora rare, la pianificazione da anni protegge tali siti. Va ricordato che la Valle di Gorino (1.330 ha) è stata classificata come Zona Ramsar (D.M. 13/07/1981)

Ora, produrre reddito nel rispetto dell'ambiente, è la cosa più difficile in assoluto.

E' evidente che in Europa trovare lembi di natura non manipolati più o meno profondamente dall'uomo, risulta impresa ardua, ma la ricchezza biogenetica delle "zone umide", in particolare dei delta, fanno sì che queste aree, pur trasformate e in continua evoluzione, siano luoghi "unici" ove paesaggio antropico e riserva biogenetica coesistono nella complessità morfologica dei luoghi e malgrado la conflittualità che tale coabitazione genera.

C'è però un "punto di non ritorno" che non va oltrepassato; occorre cioè misurare, controllare, monitorare, calibrare attentamente lo sforzo cui si sottopone un ambiente per drenarne le risorse che ci può garantire: nella Sacca di Goro questo punto è stato toccato.

La riflessione da fare riguarda certamente le contraddizioni interne ai processi di globalizzazione che hanno accentuato, anche dal punto di vista ambientale, la tensione locale/globale, la tensione cioè "fra due esigenze mutuamente irriducibili e solo apparentemente contrastanti, fra l'esigenza sempre più sentita di approcci locali, il più possibile vicini ai luoghi nei quali si manifestano i conflitti e le criticità, tali da responsabilizzare coloro cui più direttamente compete la gestione delle risorse e di valorizzarne il ruolo e le capacità, e l'esigenza di approcci e di forme di intervento e di controllo a scala sovra - locale, ai diversi livelli congruenti con la complessità e la dilatazione spaziale dei sistemi e dei processi su cui occorre intervenire."

Questa tensione interferisce inevitabilmente con ciò che concerne gli stili di governo: la contrapposizione tra le tendenze "impositive" (implicite negli approcci tecnocratici ma anche in molte istanze di tutela d'interessi generali o "superiori", di valori non negoziabili o comprimibili, come molti valori ambientali e culturali) e la ricerca di forme consensuali di governo, di strategie condivise. (R. Gambino - Oltre La Carta Della Natura - Convegno Internazionale ottobre 1998 Gargnano)

Oltre certi livelli, il valore ambientale non è negoziabile, ne va della vita stessa dell'intero areale geografico considerato.

Mi rincuora il riconoscimento "UNESCO" al territorio delizioso: "*Le residenze ducali degli Estensi nel Delta del Po illustrano l'influenza della cultura rinascimentale sul paesaggio naturale in maniera straordinaria. Il Delta del Po rappresenta un'importante pianificazione di paesaggio che mantiene la sua forma originale in una vasta estensione*". (World Heritage Committee UNESCO, annuncio a Marakesh il 2 Dicembre 1999)

Se gli Estensi riuscirono a trasformare la terra e l'acqua in un "territorio" ad "alto valore aggiunto", noi dobbiamo essere in grado di configurare una strategia comune (internazionale, nazionale, locale) per valorizzarlo.

Iniziamo intanto condividendo le conoscenze che questi studi ci consegnano. Proprio acquisendo queste conoscenze l'Ente Parco può diventare il motore principale della catena del "valore ambientale", trasformandosi da soggetto amministratore dell'esistente, ad attore protagonista della creazione del valore ambientale.

**Lucilla Previati**

Direttore Consorzio Parco Regionale del Delta del Po

## L'attività di ricerca nella Sacca di Goro

Lo studio di un ambiente lagunare deltizio, già di per sé complesso ed articolato, è ulteriormente complicato quando, come nel caso della Sacca di Goro, la sua evoluzione è stata fortemente condizionata da secolari manomissioni antropiche, perpetrate sia nel territorio circostante sia nell'ambiente lagunare. La necessità di fornire risposte utili alla programmazione d'interventi obbliga il ricercatore non solo ad analizzare le informazioni del passato, ma a formulare previsioni sull'evoluzione futura dell'area. Lo studio deve essere svolto in tempi brevi e, spesso, con scarsi fondi, poiché v'è urgenza d'intervenire. Questo modo di operare "la ricerca intesa come orpello obbligatorio dell'opera", assai comune tra Enti ed Amministratori, non tiene in conto che una base conoscitiva esaustiva dell'area è il fondamento da cui dipende il buon esito di un intervento.

L'area della Sacca di Goro non era certamente un "oggetto misterioso" perché in essa, specie negli ultimi decenni, erano stati condotti studi e ricerche di buon livello ed avviati programmi di monitoraggio fisico-chimico-biologici dell'area. La disarticolazione delle ricerche, la rapidità con cui si sono susseguiti i cambiamenti morfologici e gli interventi sulla Sacca (sempre più frequenti nell'ultimo decennio), hanno reso necessario un nuovo studio che, partendo dai dati pregressi, fornisse un quadro esauriente dell'attuale.

A tale scopo sono stati coinvolti ricercatori afferenti a diverse discipline e strutture, i cui contributi sono raccolti in questo volume. Ciò è stato reso possibile dai peculiari aspetti scientifici dell'area, che hanno stimolato l'interesse dei ricercatori, dalla possibilità di convogliare nel progetto finanziamenti provenienti da diverse fonti: (Regione Emilia-Romagna, Università e M.U.R.S.T.) e dalla fattiva collaborazione instauratasi con operatori ed amministratori locali.

Partendo da un inquadramento generale del delta del Po, lo studio prende in considerazione l'evoluzione storica e le caratteristiche geo-morfologiche della Sacca. Queste, unitamente alle caratteristiche idro-sedimentarie, hanno permesso di individuare i cicli di erosione-accrescimento dell'area. L'analisi dei dati provenienti dallo studio di carote e dell'ecosistema lagunare ha consentito di valutare sia il tasso di sedimentazione, sia lo stato della qualità della Sacca. Le informazioni acquisite, nelle diverse attività di settore, sono infine confluite per la definizione di possibili scenari futuri.

L'aspettativa di coloro che hanno lavorato per anni e che, in questo volume, presentano una sintesi delle informazioni raccolte è che questi risultino utili ed utilizzate per la programmazione gestionale della laguna. E' auspicabile che lo studio sia di stimolo alle Amministrazioni per l'attuazione di un piano geo-ambientale di sorveglianza e monitoraggio organico.

La pubblicazione del volume è stata resa possibile per i contributi forniti da diversi Enti, fra cui l'Assessorato Ambiente della Provincia di Ferrara, il Comune di Goro ed il Consorzio di Gestione della Sacca di Goro.

**Umberto Simeoni**

## Morfogenesi ed evoluzione dello Scanno di Goro (Delta del Po)

Umberto Simeoni<sup>1</sup>, Renzo Dal Cin<sup>1</sup>,  
Giorgio Fontolan<sup>2</sup> e Umberto Tessari<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara  
C.so Ercole I d'Este, 32 – 44100 Ferrara

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine, Università di Trieste.  
Comprensorio S. Giovanni, Via Weiss, 2 – 34127 Trieste

### Riassunto

La laguna di Goro, formatasi nel secolo XIX, fa parte dell'apparato deltizio del Po ed è separata dal mare da una freccia litorale (Scanno di Goro), che ne condiziona la dinamica idro-sedimentaria. L'origine della freccia è collegata alla prominente morfologia del delta del Po, che determina una deriva litoranea sostanzialmente divergente, anche se i meccanismi di formazione sono complicati dalla presenza di banchi, isole e barre in prossimità delle foci dei suoi rami deltizi. L'evoluzione dello Scanno dipende essenzialmente dall'energia e dalla direzione del moto ondoso, dalla corrente lungo riva, dalla quantità di sedimento disponibile e dall'assetto batimetrico dell'area.

Durante l'ultimo secolo, la freccia litorale è stata più volte abbandonata, smantellata e poi sostituita dalla crescita di una nuova, più esterna. Dalle indagini condotte, attraverso il confronto di carte storiche e foto aeree, appare evidente come in periodi diversi abbia presentato stili di crescita differenti: parallela, a ventaglio e ramificata.

Lo studio analizza queste modalità evolutive profondamente differenti, ponendole poi a confronto con le articolate vicende che hanno interessato l'intero territorio del delta del Po. Ciò ha consentito di mettere in evidenza come alcune attività antropiche perpetrate nella bassa pianura (prelievo di materiali in alveo, estrazioni di acqua e gas da falde poco profonde, regimazione delle piene) e sulla freccia litorale (apertura di canali, interventi di difesa) abbiano profondamente condizionato lo stile di crescita dello Scanno di Goro.

### Introduzione

La laguna di Goro fa parte dell'apparato deltizio del Po, che è caratterizzato da cinque rami principali: Po di Maistra, di Pila, di Tolle, di Gnocca (o di Donzella) e di Goro. È proprio a sud-ovest di quest'ultimo che si è sviluppata l'omonima laguna, che si estende per circa 2.000 ettari, con profondità media attorno al metro (Fig. 1). La sua storia ed evoluzione sono strettamente connesse alle vicende del Delta, e perciò la laguna rappresenta un ambiente morfologicamente complesso per la presenza di forme ereditate alle quali se ne sono sovrapposte altre di più recenti.

Nel 1971 è stata classificata fra le zone umide d'importanza internazionale secondo la Convenzione di Ramsar; nel 1982 è stata dichiarata riserva naturale di popolamento animale e, nel 1988, è stata inclusa nel Parco Regionale del Delta del Po. Questi aspetti, che ne esaltano il pregio ambientale, devono convivere con l'intenso sfruttamento economico cui è sottoposta: le attività ad essa collegate producono un reddito di circa 50 milioni €/anno e danno occupazione a circa 1.000 persone (comunicazione personale Comune di Goro). Il frequente ripetersi, negli ultimi decenni, di un'eccessiva proliferazione algale e di fenomeni d'anossia delle acque hanno innescato pesanti ripercussioni economiche.

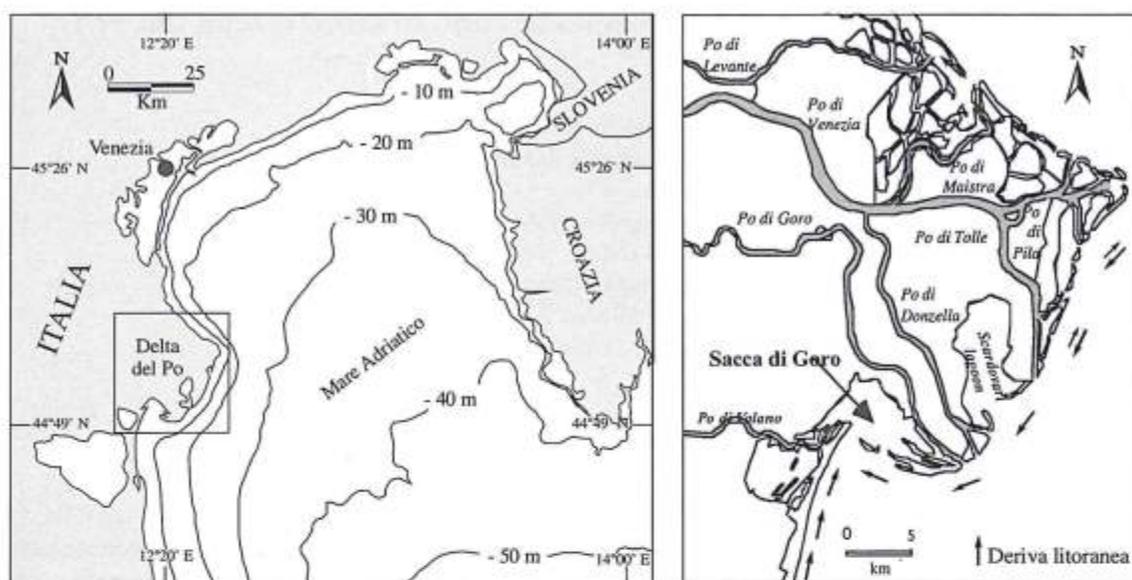


Figura 1 - Ubicazione del delta del Po, dei suoi rami fluviali e della laguna di Goro.

Questa situazione ha determinato la necessità di intervenire per modificare e migliorare gli scambi idrici della laguna con il Po ed il mare, e per favorire la circolazione idraulica interna. Nei confronti dello Scanno di Goro, che rappresenta un elemento fondamentale per l'esistenza della laguna, i recenti interventi sono stati di una certa intensità e tali da modificare la sua naturale evoluzione. Se a questi si associano le vicende più generali che, specialmente nell'ultimo secolo, hanno variato le caratteristiche idrologiche del Po e gli effetti dell'intensa antropizzazione avvenuta nel delta, appare evidente come l'area della laguna sia stata sottoposta ad *input* differenti. Questi hanno determinato cambiamenti nelle condizioni geo-ambientali di contorno che, a loro volta, hanno modificato le velocità e le modalità di crescita della freccia litorale, tanto che è possibile individuare differenti ciclicità di crescita e diversi stili evolutivi.

Spesso gli interventi effettuati nella laguna sono stati eseguiti senza alcun rispetto della naturale dinamicità morfologica dell'area. La scarsa conoscenza di ciò li ha resi in breve tempo, se non dannosi, perlomeno inutili, perché la loro progettazione non aveva previsto il successivo scenario morfologico. Lo studio condotto intende fornire ulteriori basi conoscitive per formulare attendibili proiezioni sull'evoluzione futura dello Scanno e, quindi, dell'assetto ambientale della Sacca di Goro.

### Evoluzione degli scanni di Goro

Con gli interventi effettuati dalla Repubblica di Venezia per modificare l'assetto idrografico dei rami del Po, nei primi decenni del XVII secolo scompare l'antica laguna di Goro (Bondesan e Simeoni, 1983; Simeoni e Bondesan, 1997). All'inizio del '800 il margine meridionale del Delta, che ha assunto una forma lobata, presenta due grandi penisole che delimitano le insenature della nuova laguna di Goro e della Sacca di Scardovari (Bondesan, 1985). Le cartografie storiche mostrano come già dal 1870 la laguna aveva una forma molto simile all'attuale, con il piccolo delta del Po di Volano che si protrae al suo interno. In esse, per la prima volta, troviamo rappresentato lo Scanno, che si protendeva verso ovest dalla foce dell'attivo ramo del Po di Goro (Barbujani, 1974).

I processi ed i meccanismi legati allo sviluppo ed alle morfologie delle frecce litorali sono stati argomento di numerosi studi (Kumar e Sanders, 1974; Aubrey e Gaines, 1982; Carter e Orford, 1991; Uda e Yamamoto, 1991; Kraus, 1999; Raper et al., 1999), sia per l'importanza che rivestono

nell'ambiente litorale sia perché sono elementi geomorfologici complessi (Carter, 1988), molto comuni anche lungo coste irregolari (Komar, 1976).

L'origine dello Scanno di Goro è certamente collegata alla prominenza morfologica del delta del Po che determina (Dal Cin, 1983) un trasporto litoraneo lungo riva divergente (Fig. 1), anche se i meccanismi di formazione (Kindson, 1963; Meistrell, 1966; Carter 1988; Losada et al., 1991) vengono complicati dalla formazione di banchi, isole e barre in prossimità delle foci dei suoi rami deltizi.

L'evoluzione delle frecce litorali dipende essenzialmente dall'energia e dalla direzione del moto ondoso e delle correnti lungo riva, dalla quantità di sedimento disponibile e dalla profondità dei fondali. Anche la variabilità, la tipologia ed i cambi morfologici delle bocche lagunari giocano un ruolo fondamentale nella ricerca della loro forma d'equilibrio. L'apertura o la chiusura delle bocche, le variazioni di dimensione e posizione dei delta di flusso e riflusso determinano una variazione del sistema d'erosione e deposito nei litorali adiacenti, cambi morfologicamente significativi nel canale e nei fondali ad essi associati, e nell'area di laguna retrostante (Boothroyd, 1978; Hubbard et al., 1979; Fitzgerald, 1988; Oertel, 1988).

Studi condotti (Kindson, 1963) hanno evidenziato come l'evoluzione di questi elementi morfologici avvenga attraverso successive fasi costruttive. Le relazioni tra i processi fisici e lo sviluppo delle morfologie degli scanni sono state analizzate anche attraverso simulazioni con modelli probabilistici (King e McCullagh, 1971; Carter, 1988, Raper et al., 1999; Kraus, 1999).

Lo smantellamento delle frecce, nell'area in esame, avviene attraverso un'erosione, seguita da una frammentazione, per successive rotture, ed un progressivo allargamento dei canali di rotta. Queste modalità sono ben documentate sia da rilievi topo-batimetrici sia dalle immagini aeree (Fig. 2).

Il sistema freccia-isola barriera viene via via sottratto all'azione del moto ondoso ed all'alimentazione litoranea per lo sviluppo di una nuova freccia litorale, a volte impostata sui resti della piattaforma di una freccia litorale abbandonata, come già riscontrato da Meistrell (1966) e Galichon (1985). Il mancato contributo sedimentario, gli eventi di tempesta e gli abbassamenti del suolo progressivamente smantellano la vecchia freccia litorale (Dal Cin, 1994). L'analisi dei documenti non ha però evidenziato fenomeni di migrazione verso terra degli scanni, come segnalato da Hèquette e Ruz (1991) e Hequette et al. (1995), anzi hanno messo in rilievo come le nuove forme si attestino in posizioni sempre più progradate verso mare. Ciò suggerisce che anche nei momenti di massima crisi degli apporti fluviali l'area della freccia è sempre stata rifornita con sedimenti provenienti dall'erosione della cuspidè deltizia di Goro e dai litorali adiacenti (Simeoni et al., 1998).

La comparsa dei nuovi scanni, diversamente da quanto riscontrato in altre aree di studio (De Boer, 1981), è poco più che ventennale e, nell'ultimo ottantennio, la loro crescita è avvenuta attraverso differenti stili morfologici, confermando la complessità evolutiva delle frecce litorali ubicate in corrispondenza degli sbocchi fluviali con cospicue portate (Riddell e Fuller, 1995).

L'analisi d'alcuni parametri classici d'indagine costiera indica che:

- il regime del moto ondoso (Idroser, 1994), le pendenze dei fondali marini (Bondesan e Simeoni, 1983) e la distribuzione delle portate del Po tra i vari rami (Idroser, 1994) hanno subito limitate variazioni;
- il trasporto lungo riva nell'area della laguna è sempre rimasto bidirezionale, con assi di transito fra loro quasi ortogonali (Dal Cin e Simeoni, 1984);
- la laguna ha sempre funzionato come trappola per i sedimenti (Dal Cin, 1994) ed i suoi fondali hanno sempre presentato profondità poco superiori al metro (Simeoni et al., 1998).

Per la comprensione dell'evoluzione dello Scanno di Goro bisogna quindi considerare anche altri fattori, come hanno suggerito Davis e Hayes (1984) e Hequette e Ruz (1991) per altre aree di studio, meno diretti, che pur agendo nell'entroterra del delta possono influire, con il mutare della loro frequenza ed intensità, nello sviluppo della freccia litorale. C'è pertanto la necessità di interpretare questo fenomeno attraverso l'analisi delle variazioni parametriche sia dei fattori marini, sia di quelli che più usualmente vengono utilizzati per caratterizzare la parte emersa del delta: velocità di abbassamento del suolo, portate ed eventi di piena, interventi antropici diretti ed indiretti sul territorio.

Sulla base di queste considerazioni è possibile individuare tre periodi in cui i fattori, pur con le dovute cautele per l'incompletezza delle serie storiche, presentano differenti andamenti e lo Scanno evidenzia modalità evolutive sostanzialmente diverse.

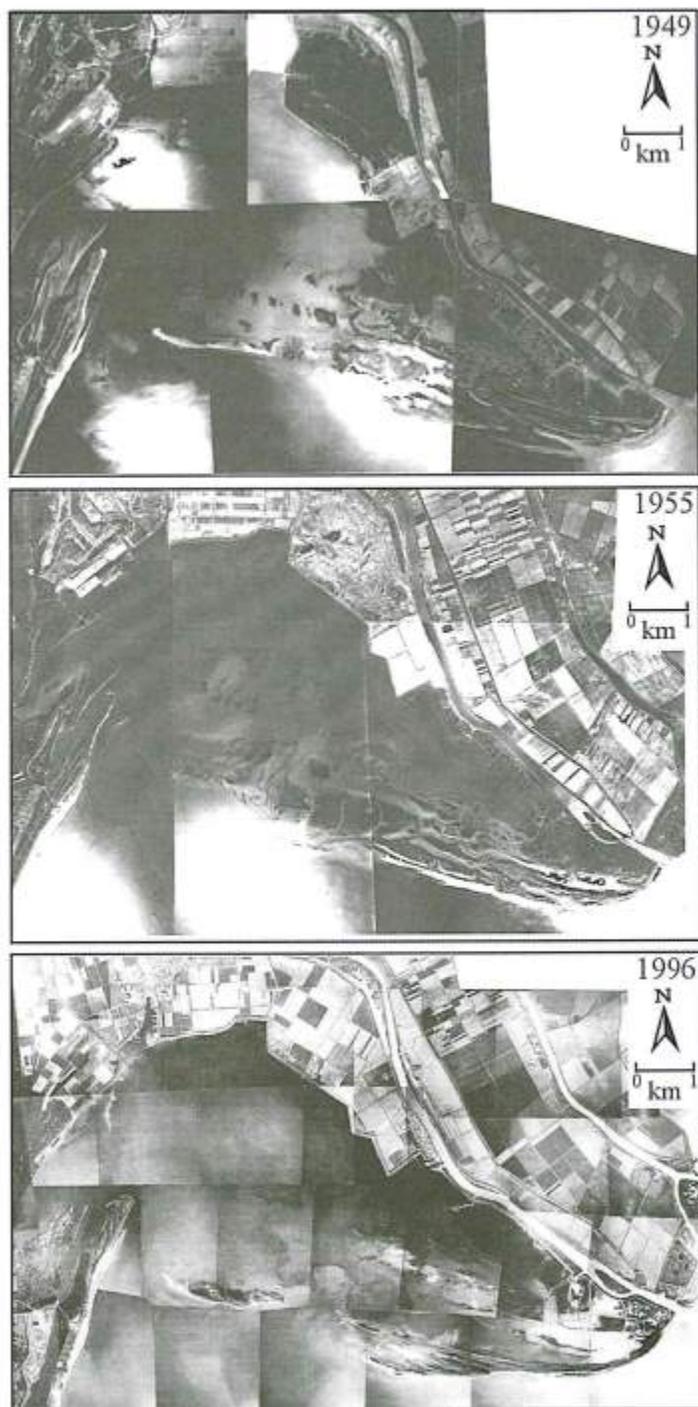


Figura 2 - Fotomosaici della laguna di Goro che mettono in evidenza le modalità di frammentazione e distruzione degli scanni. A causa della deformazione dei fotomosaici la scala è approssimativa.

## Evoluzione del territorio

### Dall'inizio secolo agli anni '40

Nella prima metà del secolo l'area del delta era caratterizzata da importanti contributi solidi da parte del Po. Il trasporto torbido medio (Fig. 3) tra il 1918 ed il 1944 è stato di circa 12,5 Milioni di t/anno, con minimi deflussi nel biennio 1942-43, senza manifestare, pur con oscillazioni tendenzialmente cicliche (periodi 1918-25, 1926-33 e 1934-44), variazioni significative. La portata media annua tra il 1918 ed il 1949 è stata di 1.390 m<sup>3</sup>/s e nello stesso periodo sono stati registrati 12 eventi di piena con portate superiori a 6.500 m<sup>3</sup>/s e con frequenze molto variabili. Secondo alcune stime (Idroser, 1994) sulla base delle variazioni volumetriche del Delta in prossimità della costa, si può ipotizzare che, nel periodo 1900-40, l'area di Goro abbia ricevuto un apporto medio di materiale sabbioso attorno a 4,5-5 Mm<sup>3</sup>/anno.

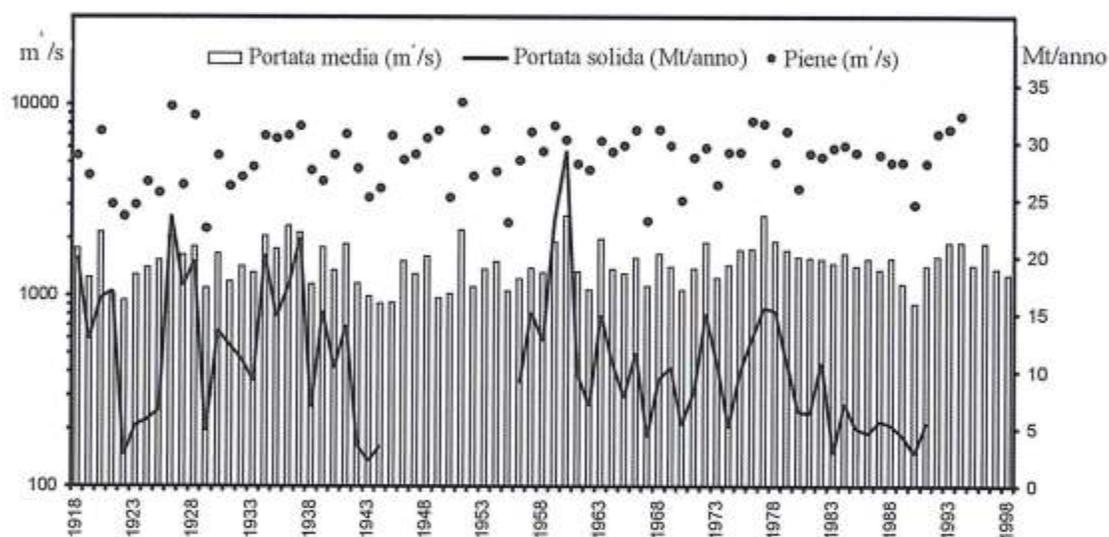


Figura 3 - Distribuzione della portata liquida e torbida e degli eventi di piena avvenuti tra il 1918 ed il 1998. Le serie sono incomplete per la mancanza di registrazioni.

Alla subsidenza naturale, dopo il 1938, vanno aggiunti gli abbassamenti dovuti all'estrazione d'acque metanifere dai giacimenti quaternari. Sulla base degli studi condotti (Bondesan e Simeoni, 1983) si può stimare che, per il periodo 1900-1957, il territorio di Goro abbia subito abbassamenti medi, pur differenziati tra zona e zona, di circa 8 mm/anno.

Fino agli anni cinquanta la foce del Po di Goro è sempre avanzata verso mare, con ritmi via via decrescenti (Fig 4): tra il 1599 ed il 1869 (270 anni) il protendimento è stato di circa 80 m/anno (Barbujani, 1966), verso la fine del XIX secolo ed inizio del XX (periodo 1893-1911) l'avanzamento è stato di circa 10 m/anno, che è poi passato, tra il 1911 ed il 1932-34, a 17 m/anno ed a 5 m/anno nel ventennio successivo. Il continuo progredire dell'apparato di foce del Delta e di quello del Po di Goro, con ritmi d'accrescimento cospicui ma discontinui, suggerisce uno stretto legame tra questi e le ricorrenti piene del fiume.

Agli inizi del XX secolo la laguna di Goro risulta separata dal mare da due scanni ben sviluppati. Il più interno, posto a nord del vecchio faro, si presenta frammentato da una serie di piccole rotte.

Esso quasi ocludeva la laguna e la lunghezza complessiva del sistema scanno-isole può essere stimata attorno a 6 km. Il secondo, attestato in corrispondenza della foce, presentava uno sviluppo assai minore ed era ubicato in una posizione più interna dell'attuale.

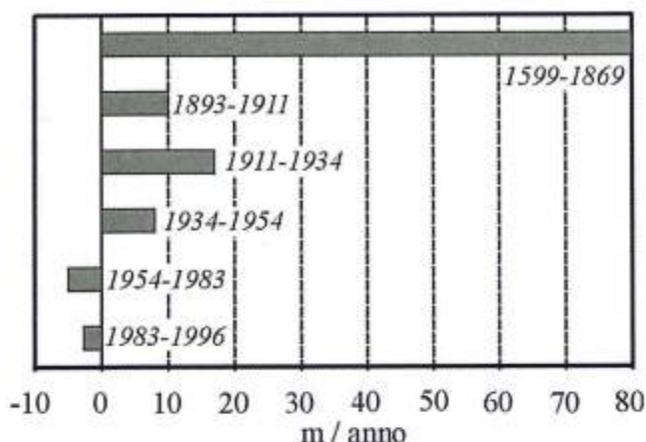


Figura 4 - Diagramma delle variazioni della linea di riva nell'area di foce del Po di Goro. I valori si riferiscono ad un tratto di litorale ubicato a ridosso della sponda destra del fiume e lungo circa 1 km.

Parte di questo sistema è ancora visibile, anche se in prevalenza scomparso, nell'estremità orientale della laguna. Attorno agli anni '40 inizia a delinearsi l'attuale sistema di frecce litorali che si sviluppa verso ovest/nord-ovest, lungo una direzione ruotata in senso antiorario rispetto al precedente; nel 1950 raggiunge una lunghezza complessiva di circa 5 km.

#### *Dagli anni '40 agli anni '80*

La portata media tra il 1945 ed il 1983 è stata di circa  $1.507 \text{ m}^3/\text{s}$  e si sono verificati 13 eventi di piena superiori a  $6.500 \text{ m}^3/\text{s}$  con frequenze assai ravvicinate (Fig. 3); particolarmente significativa è stata quella del 1951 che ha raggiunto i  $10.300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ad un incremento di portata media è corrisposto un trasporto torbido medio, tra il 1953 ed il 1973, più ridotto ( $11,9 \text{ Mt}/\text{anno}$ ), con punte massime nel biennio 1959-60. La diminuzione del trasporto torbido medio è registrabile soprattutto dopo i primi anni '60.

Gli studi di Idroser (1994) suggeriscono che nel 1960 il fiume abbia portato circa  $2 \text{ Mm}^3$  mentre nei primi anni '70 il suo trasporto fosse compreso tra  $0,8-1 \text{ Mm}^3/\text{anno}$ . La contrazione del trasporto solido è in buona parte da ascrivere all'attività estrattiva iniziata a livelli sensibili negli anni '50, in concomitanza con la costruzione di reti stradali ed autostradali e con l'espansione edilizia. Il prelievo di materiali in alveo ha raggiunto nel periodo 1978-82 i massimi valori: si può a tale proposito stimare che nel solo alveo del Po sia stata asportata nel 1979 una quantità doppia di quella complessivamente arrivata al mare nel decennio 1964-73 (Idroser, 1983). Successivamente, per arrestare e porre rimedio al degrado dei corsi d'acqua, i quantitativi concessi all'estrazione hanno subito una graduale riduzione.

Oltre al diminuito apporto di materiale, l'area del Delta in questo periodo ha presentato importanti incrementi degli abbassamenti del suolo riconducibili alle attività estrattive di acque metanifere ed alle bonifiche: ad esempio tra il 1950 ed il 1959 sono state prosciugate le aree immediatamente contigue alla laguna di Goro. La subsidenza nell'area aumenta in modo notevolissimo verso gli anni '50, in particolare nel periodo 1951-62.

Negli anni successivi in parte si attenuava, pur mantenendo abbassamenti assai rilevanti: si può stimare che complessivamente nel ventennio 1950-70 vi sia stato un abbassamento medio del territorio di circa 50 cm.

Le immagini del 1949 (Fig. 5) mostrano un'area dello Scanno molto articolata e caratterizzata dalla presenza di ben cinque lineamenti morfologici, parzialmente affioranti, riconducibili a vecchi scani. Il confronto fra le immagini del 1949 e del 1955 fornisce un esempio della loro modalità evolutiva: mentre l'ultimo, il più esterno e recente, si allunga ed allarga, quello immediatamente retrostante, non più sufficientemente rifornito, si frammenta e viene parzialmente smantellato, anche per effetto della subsidenza.

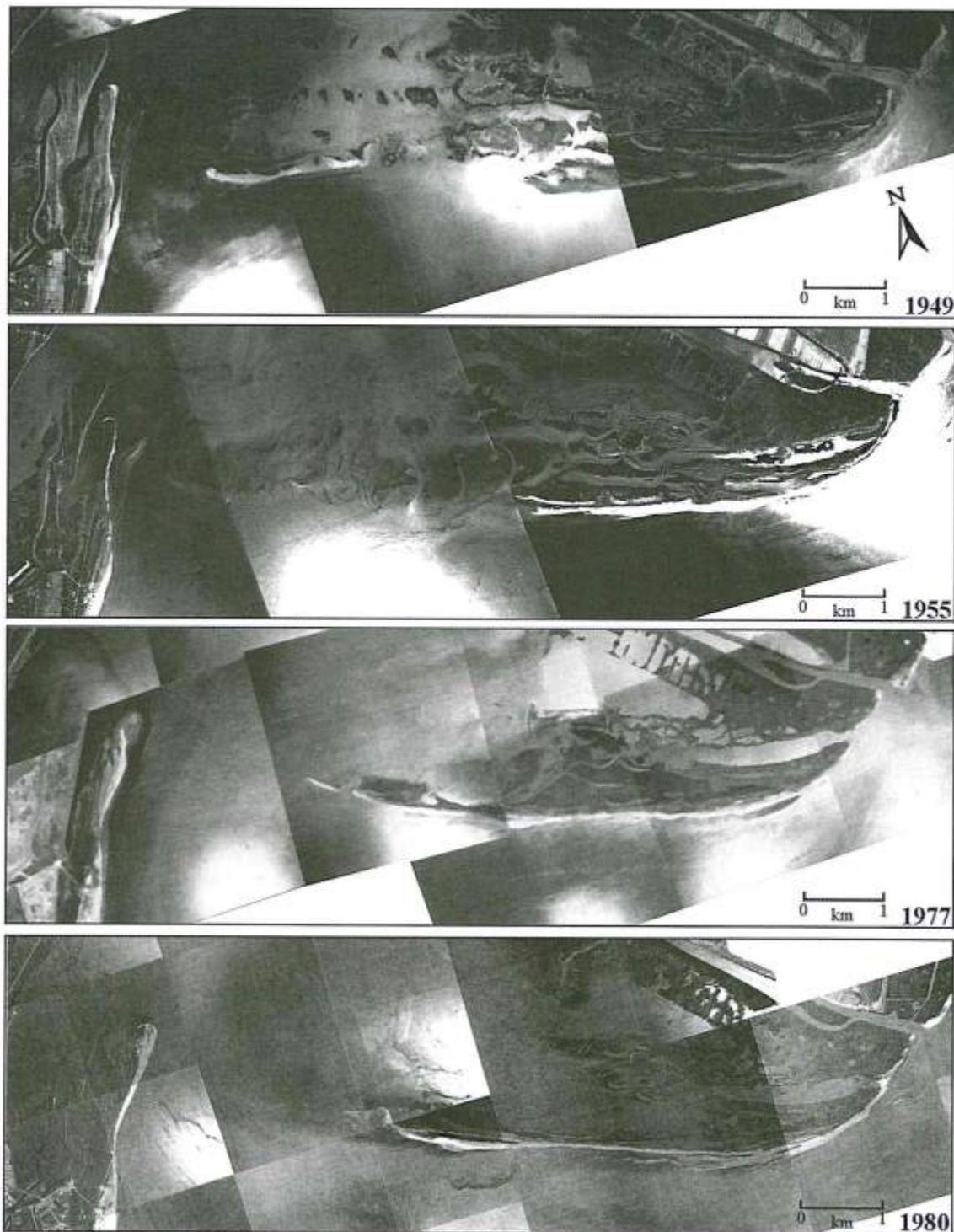


Figura 5 - Fotomosaici dell'area dello Scanno di Goro che ne documentano l'evoluzione fra il 1949 ed il 1980.

Per evidenziare e quantificare le principali variazioni morfologiche avvenute nello Scanno, sono stati posti a confronto i rilievi del 1934 e del 1955 (Fig. 6). Sovrapponendo alle immagini digitalizzate una griglia lunga 12,5 km e suddivisa in 90 sezioni, parallele e distanziate di 100 m, sono state evidenziate e quantificate (McBride e Byrnes, 1997) le diverse tendenze evolutive: avanzamento od arretramento, allungamento od accorciamento, stabilità, rotazione verso mare o verso terra, rottura, comparsa o scomparsa d'aree emerse. Le più evidenti modificazioni intervenute in questo periodo sono costituite dalla scomparsa dell'isola-barriera (con una superficie di circa 0,41 km<sup>2</sup>), che delimitava ad ovest la laguna, dallo sviluppo, in una posizione più avanzata, di una nuova freccia litorale, più lungo del precedente, e dal protendimento verso mare della foce del Po di Goro. Ciò ha determinato la formazione di un'unica grande bocca lagunare, interrotta da una piccola isola, lunga circa 300 m. Tra i due rilievi vi è stato un incremento della superficie emersa di 0,29 km<sup>2</sup>, prevalentemente dovuto all'allungamento ed all'allargamento dello Scanno (0,61 km<sup>2</sup>), compensato dallo smantellamento di alcune isole (perdita di 0,32 km<sup>2</sup>).

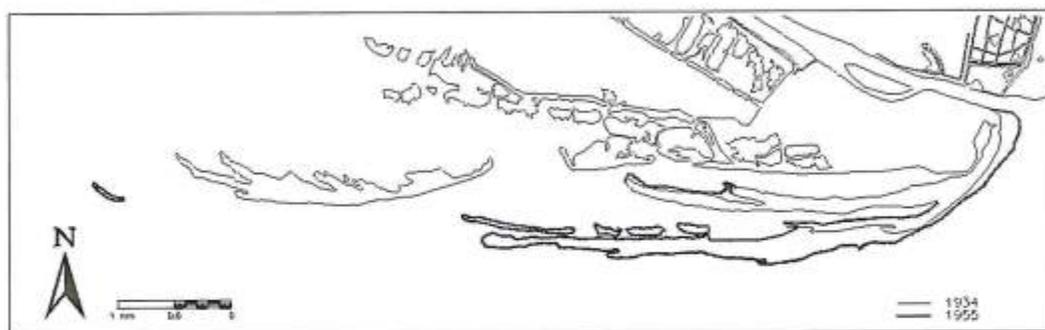


Figura 6 - Confronto tra le linee di riva del 1934 e 1955.

Nel periodo in esame si è passati da un sistema freccia - isola ad uno costituito dal solo Scanno e sono prevalsi i seguenti movimenti: avanzamento e rotazione antioraria della parte orientale, allungamento e crescita verso mare del tratto occidentale della freccia.

Mentre l'area di foce del Po di Goro seguiva la tendenza evolutiva del delta, con arretramenti di 4-5 m all'anno tra il 1954-68 e di 8-9 m/anno nel decennio successivo, nello stesso periodo la freccia si allungava di circa 2,8 km. L'allungamento non è stato progressivo ma è avvenuto attraverso fasi distinte: nella prima, tra il 1950 ed il 1964, lo Scanno si allunga fino a raggiungere i 6,7 km; nella seconda (1964-71) si accorcia di circa 500 m ma, successivamente, riprende ad allungarsi tanto che nel 1977 si estende per 7,8 km. Nel fotomosaico del volo del 1977 (Fig. 5) le frecce interne, presenti nel 1949 e nel 1955, risultano oramai quasi completamente sommerse.

I fenomeni erosivi, sempre più intensi, hanno determinato, in prossimità della foce, la rottura della freccia più esterna, sul quale però si evidenzia il germe di una nuova crescita. Nei tre anni successivi (1977-80) il perdurare della crisi erosiva del delta del Po ricade anche sullo Scanno che si accorcia di circa 1 km e si restringe, ma si rinsalda con l'apparato di foce del Po di Goro.

Le immagini evidenziano come oramai l'origine dei nuovi protendimenti morfologici si sia allontanata dalla foce di circa 1 km; qui sono presenti numerosi depositi sabbiosi, alcuni di notevole entità, che costituiranno la piattaforma di nuove digitazioni. Per salvaguardare il territorio lagunare, messo in crisi dagli abbassamenti del suolo e dai fenomeni erosivi del litorale, vengono attuati numerosi interventi difensivi sia all'interno della laguna che lungo la freccia litorale.

Utilizzando la metodologia precedentemente descritta è stato effettuato un computo delle variazioni intervenute tra il 1955 ed il 1981/83 (Fig. 7).

In questo periodo lo Scanno si è molto sviluppato, continuando a crescere in lunghezza (circa 2,7 km), con conseguente riduzione della larghezza della bocca lagunare, e la superficie emersa risulta notevolmente aumentata (1,07 km<sup>2</sup>). Per contrastare gli intensi fenomeni erosivi nell'area di foce ed

il continuo assottigliamento del tratto terminale della freccia, che in pochi anni avrebbe determinato l'apertura di una seconda bocca lagunare, tra 1979-81 sono state messe in opera difese radenti e pennelli.

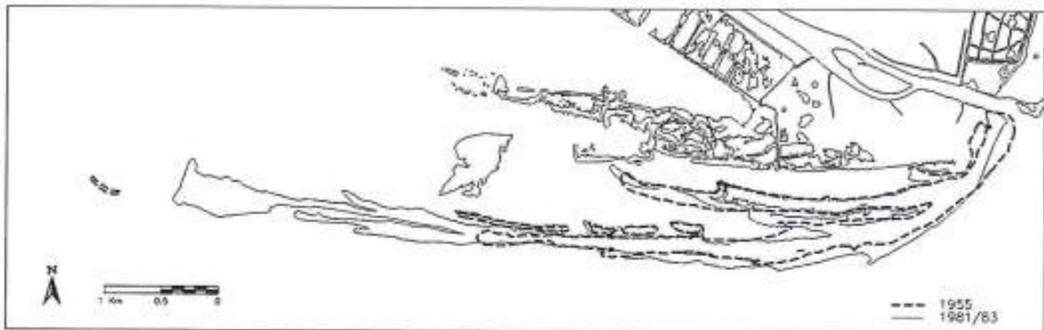


Figura 7 - Confronto tra le linee di riva del 1955 e 1981-83. Il rilievo più recente è stato completato in anni successivi.

Ciò ha sconvolto l'unitarietà evolutiva dello Scanno ed ha dato origine a tre distinti tratti con dinamiche morfologiche molto diverse (vedi volo 1980; Fig. 5): il primo, che dalla foce del Po di Goro si estende per 3 km circa, è caratterizzato da un cospicuo arretramento nell'estremità orientale ed avanzamenti in quella occidentale, dalla presenza di piccole sfrangiature e spostamenti rotatori verso mare. Il secondo tratto, lungo circa 1,4 km, costituisce la parte centrale della freccia e presenta un litorale rettilineo, senza particolari articolazioni: è sostanzialmente stabile, anche se la ristretta sezione lo rende particolarmente fragile all'attacco delle onde. L'ultimo, che presenta una morfologia molto articolata ed evidenti sfrangiature, occupa la parte terminale dello Scanno; sviluppatosi dopo il 1955 è ruotato leggermente verso la laguna.

#### *Dagli anni '80 ad oggi*

I dati rilevati tra il 1984 ed il 1997, evidenziano una riduzione della portata liquida del Po (1486 m<sup>3</sup>/anno) rispetto al periodo precedente, anche se il triennio 1992-94 è stato caratterizzato da significative piene. A questa riduzione è corrisposta una diminuzione del deflusso torbido, che si è attestato sui 5,1 Mt/anno (valore medio periodo 1984-91).

Per l'ultimo ventennio sono disponibili stime (Idroser, 1994) sufficientemente accurate dell'effettivo budget sedimentario dell'area di Goro: nell'area sono giunti nel 1980 0,19 Mm<sup>3</sup>/anno di sedimenti, 0,21 Mm<sup>3</sup>/anno nel 1985, 0,24 Mm<sup>3</sup>/anno nel 1990 ed, infine, 0,25 Mm<sup>3</sup>/anno nel 1995. E' interessante notare come l'incremento dei volumi di materiale trasportato a mare si attenui progressivamente. Ciò è probabilmente ricollegabile alla progressiva chiusura delle cave in alveo dopo che, tra il 1978 ed il 1982, le escavazioni avevano raggiunto i massimi valori. Alle quantità di materiali portati dai rami del Po vanno aggiunti 0,3 Mm<sup>3</sup>/anno di sedimenti trasportati dalla corrente lungoriva che risale da meridione e si esaurisce nella laguna.

In quest'ultimo ventennio gli abbassamenti dell'area sono proseguiti con ritmi sostenuti: Idroser (1996) ipotizza per il periodo 1984-93 velocità comprese tra 16,3 e 36,1 mm/anno.

Tra il 1980 ed il 1986 si assiste ad una sensibile variazione della forma e della lunghezza della freccia litorale (Figg. 5 e 8). I rilievi del 1986 evidenziano l'ulteriore assottigliamento dello scanno che ormai ha assunto una forma molto lineare, a causa dei numerosi interventi antropici ai quali è stato sottoposto; le isole sabbiose rilevate nelle foto del 1980 si sono ormai evolute in nuove frecce. Una simile digitazione, meno sviluppata, si ritrova anche nella parte terminale. Quest'andamento evolutivo prosegue anche nei tre anni successivi, attraverso lo sviluppo dei nuovi scanni e restringimento

di quello vecchio, la cui unitarietà è stata interrotta dallo scavo di un canale artificiale, aperto abusivamente.

Si può stimare che complessivamente tra il 1986 ed il 1991 vi sia stato un protendimento dello scanno verso il Po di Volano di circa 450 m. Successivi voli (1991 e 1993) mettono in evidenza il progressivo allargamento del canale artificiale oggi ampio circa 1 km, il prolungamento delle vecchie digitazioni e la crescita di nuove. Nel rilievo del 1996 lo scanno si è trasformato in un sistema scanno-isola e la digitazione del 1986 ha oramai sostituito quella precedente. Su quello più esterno si sta formando una nuova digitazione, ben evidente anche nel volo del 1997.

La sovrapposizione dei rilievi del 1981/83 e del 1996 (Fig. 9) mette in evidenza come la sezione della freccia sia diminuita mentre sia continuato il protendimento verso Ovest, con conseguente riduzione della bocca principale. La perdita in superficie emersa, dovuta allo sviluppo della bocca secondaria, è stata di circa 0,03 km<sup>2</sup>. L'isola venutasi a creare, evidenzia un allungamento verso ovest di circa 1 km ed una tendenza alla rotazione, in senso orario, verso l'interno della Sacca. La freccia litorale, in tale periodo, mostra una generale tendenza all'erosione, soprattutto nella parte orientale, ove si assiste ad una perdita in superficie di 0,01 km<sup>2</sup>. Nella parte centrale dello Scanno è invece evidente un forte protendimento verso mare, con la nascita di numerose e pronunciate digitazioni.

### Stili evolutivi degli scanni

Fino agli anni '50 il delta del Po mostrava la tipica configurazione di delta dominati dagli apporti fluviali. I cospicui apporti solidi annui attenuano gli abbassamenti del suolo. Anche la foce di Goro presenta questa tendenza pur con velocità di crescita non costanti, perché legate soprattutto alle ricorrenti piene fluviali (Fig. 10a). Il veloce protendimento dell'apparato di foce del Po di Goro fa sì che lo Scanno si trovi, in breve tempo, arretrato rispetto alla posizione della sua naturale fonte di alimentazione. Il diverso assetto idro-sedimentario dell'area determina legami sempre più deboli tra foce e freccia litorale, anche perché le grandi quantità di sabbie, portate ad impulsi dal fiume e distribuite dal mare, danno origine ad uno scanno ancorato al nuovo apparato di foce. L'innalzamento progressivo dei fondali e le non mutate condizioni meteomarine fanno sì che esso cresca lungo una direzione quasi parallela al precedente. La vecchia freccia litorale, sempre meno alimentata, non può compensare gli abbassamenti e viene via via frammentata e smantellata. In questo periodo (Simeoni et al., in preparazione) crescono quindi scanni fra loro quasi paralleli e distanziati in base alla crescita della foce (Fig. 10b).

Nel trentennio successivo (1950-80) sono avvenuti profondi cambiamenti delle caratteristiche ambientali dell'area (Fig. 10a) tanto da trasformare l'apparato di foce del Po da delta dominato dagli apporti fluviali a delta dominato dal moto ondoso (Dal Cin, 1983). I caratteri salienti che contraddistinguono questo periodo possono essere così riassunti: a) frequenti piene del Po, in media una ogni due-quattro anni; b) riduzione dei contributi solidi per gli intensi prelievi in alveo d'inerti; c) incremento notevole della velocità della subsidenza per l'estrazione di acqua metanifera e per le estese bonifiche; d) abbassamenti differenziati dei fondali; e) asimmetrico arretramento della foce del Po di Goro, più marcato nel lobo destro; f) sostanziale stabilità del litorale di Volano ed erosioni nello Scanno di Goro, quest'ultime in parte contrastate con opere di difesa.

La quantità ridotta dei materiali portati dal Po di Goro e l'incremento della subsidenza determinano la cessazione del processo di crescita del suo fronte deltizio, che entra in crisi. Gli arretramenti che si verificano nell'area di foce nei periodi di minor portata sono parzialmente compensati durante le piene; ciò determina un movimento oscillatorio del fronte attorno ad un fulcro. Seppur in quantità ridotta i materiali, portati dalle frequenti piene e quelli provenienti dall'erosione delle spiagge in sinistra di foce, sono trasferiti verso ovest dal moto ondoso.

Mentre il litorale prossimo al delta va in erosione, il resto dello Scanno pur assottigliandosi si allunga e con esso si sviluppa una piattaforma di swash, ristretta in prossimità della foce e più allargata all'estremità opposta, in prossimità della bocca tidale (Meistrell, 1966).

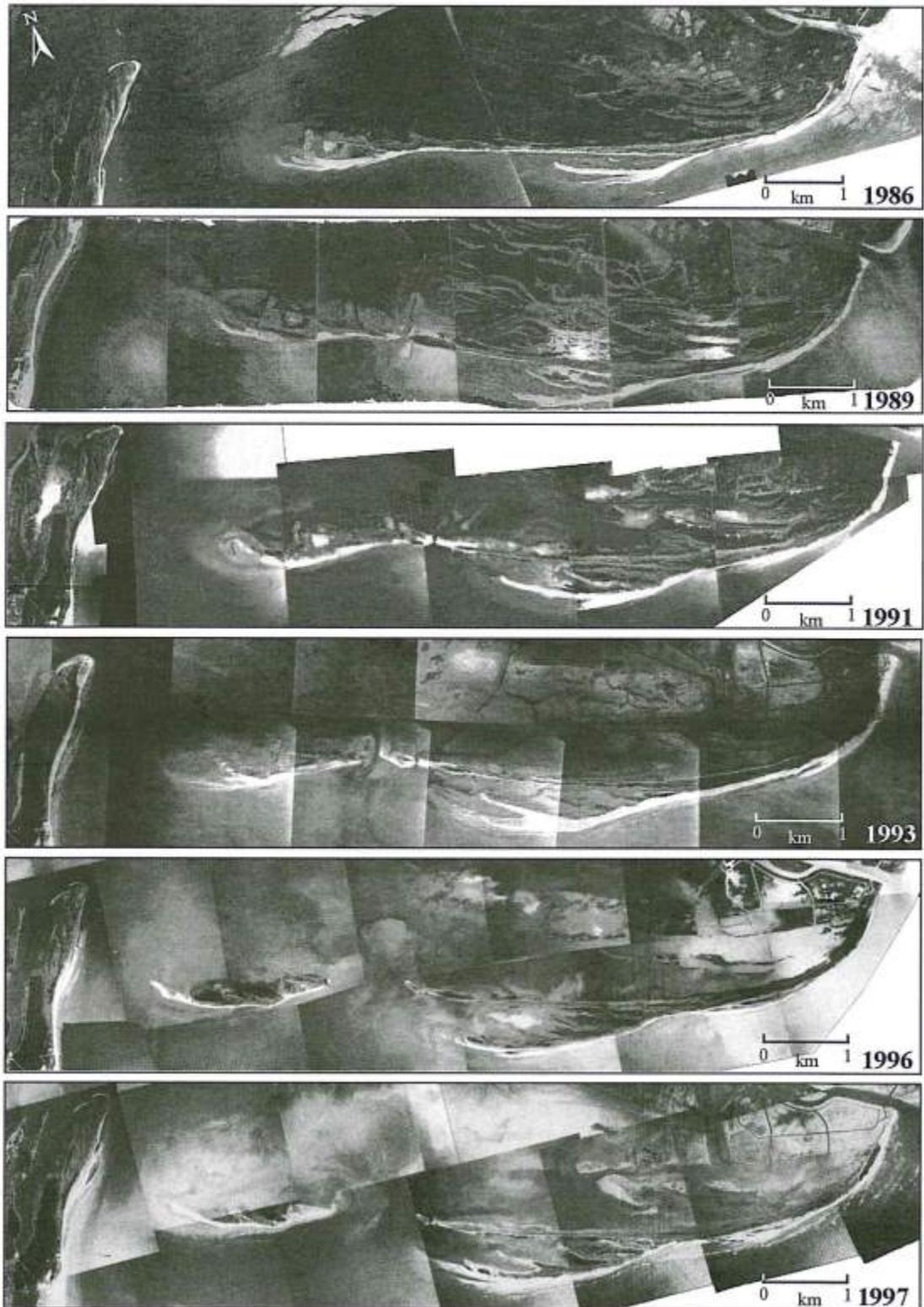


Figura 8 - Fotomosaici dell'area dello Scanno di Goro che ne documentano l'evoluzione fra il 1986 ed il 1997.

I materiali di successive piene vanno in parte a ristabilire provvisoriamente la vecchia linea di riva dell'area di foce e in parte vengono trasferiti verso l'estremità dello spit lungo la piattaforma. La geometria di quest'ultima determina il transito dei nuovi contributi lungo una direttrice più progradata rispetto all'asse della freccia litorale. Ciò da inizio alla crescita di un nuovo spit che ha origine nello stesso punto del precedente, ma che è ruotato verso mare rispetto ad esso. E' plausibile ipotizzare che questa modalità di crescita sia stata favorita anche dagli abbassamenti differenziati presenti in tutta l'area del delta ed anche nella laguna di Goro. In base alle informazioni disponibili sembra, infatti, che i valori di subsidenza siano stati meno intensi nella parte centrale della laguna rispetto alle sue estremità, accentuando così il differente gradiente morfologico della piattaforma dello scanno. Secondo quest'ipotesi gli scanni presentano origini quasi coincidenti e direzioni di crescita a ventaglio (Dal Cin, 1994), divergenti verso mare (Fig. 10c), con ritmi di crescita più blandi rispetto al periodo antecedente agli anni '50.

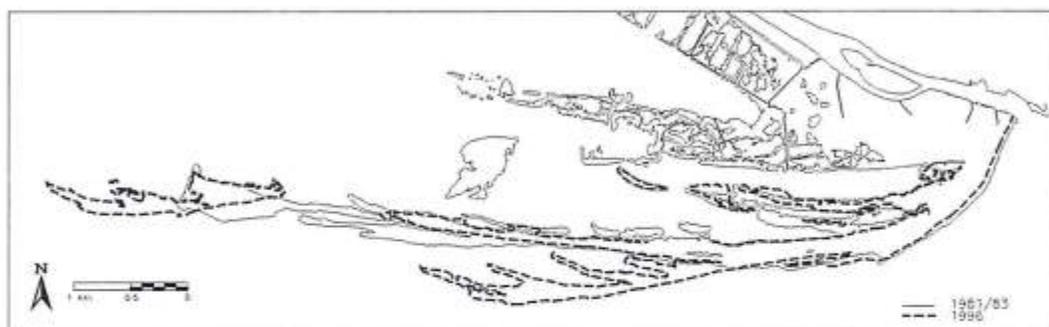


Figura 9 - Confronto tra le linee di riva del 1981-83 e 1996.

Dalla metà degli anni '80 ad oggi le condizioni generali dell'area (Fig. 10a) sono mutate ulteriormente: a) forte diminuzione delle concessioni delle estrazioni in alveo; b) ridotto trasporto solido del Po, che però presenta lievi segnali di ripresa; c) attenuazione dei fenomeni di subsidenza; d) intensificazione degli interventi antropici, che con aperture di canali, pennelli ed opere radenti hanno irrigidito lo sviluppo di parte dello scanno e dato origine ad una nuova bocca lagunare.

Con scarsi apporti da parte del fiume si verifica una riduzione del trasporto dei sedimenti lungo riva. Il materiale che giunge alla foce viene trasportato per brevi tratti e ad impulsi, ma non riesce a disperdersi uniformemente. Conseguentemente lo scanno tende a presentare tratti contraddistinti da fenomeni di erosione, seguiti sottoflutto da tratti in accumulo. Questo nuovo assetto innesca una frammentazione morfodinamica dello scanno, che viene così suddiviso in celle, secondo lo schema di cannibalizzazione a piccola scala (più celle attigue autoregimentate da una dinamica erosione-accumulo) proposto da Orford et al. (1996).

Nel caso dello Scanno di Goro questo fenomeno si è sviluppato alle estremità, ma non nel tratto centrale, forse a causa delle manomissioni antropiche. Questo tratto si è assottigliato progressivamente fino alla fine degli anni '80; successivamente l'apertura e lo sviluppo della nuova bocca e la concomitante crescita di nuove frecce litorali verso mare ne hanno causato la frammentazione e l'abbandono della sua porzione più orientale.

In definitiva l'origine della geminazione di un nuovo scanno non risulta più coincidente con l'area sorgente, ma traslata sottoflutto alla deriva litorale. Nel tempo la posizione delle celle si modifica, probabilmente a causa di variazioni del potenziale di trasporto lungo riva dovuto a riassetto batimetrici e ai conseguenti fenomeni di rifrazione. In questo modo il fulcro delle nuove geminazioni si sposta progressivamente verso mare e lungo la direzione del trasporto litoraneo, dando origine a una freccia con crescita ramificata (Fig. 10d).

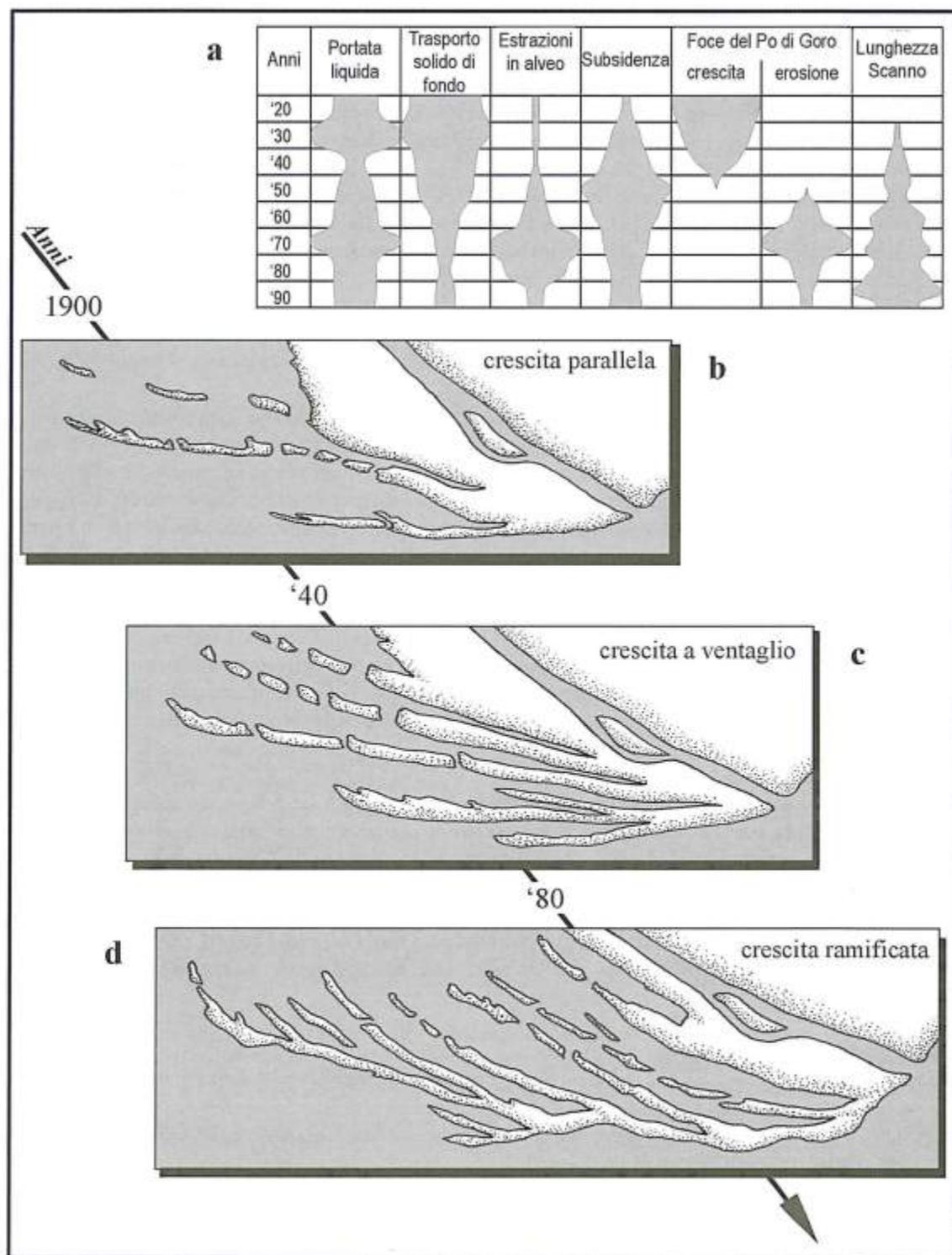


Figura 10 - Schemi semplificati (b, c, d) dei diversi stili di crescita dello spit di Goro. La tabella (a) riporta qualitativamente le variazioni d'alcuni parametri ambientali dell'area del Delta e della laguna di Goro.

## Considerazioni

Nella bibliografia analizzata sono ben sviluppate analisi inerenti la nascita, crescita e smantellamento degli scanni, definendone le cause e l'eventuale ciclicità. Il caso presentato, forse perché fortemente anomalo, mette in rilievo come la morfogenesi delle frecce litorali può mutare, presentando diversi stili evolutivi. Per la loro comprensione è stato necessario risalire a cause con origine assai lontana e non necessariamente legata all'ambiente marino.

Nell'area di Goro appare evidente che il fattore uomo ha condizionato pesantemente, anche con interventi attuati nella bassa pianura, la crescita degli scanni. La distanza fra la causa e l'effetto, il ritardo dei tempi di risposta ed i diversi ambienti in cui essi operano concorrono a rendere difficoltoso il loro collegamento. Se a ciò aggiungiamo l'incompletezza o la mancanza di significative serie storiche e la settorialità scientifica con cui questi studi, a volte, sono svolti, appare evidente come possono sfuggire o non essere sufficientemente approfonditi importanti aspetti dell'evoluzione di queste morfologie. Anche se non si ritenessero valide le ipotesi proposte, resta il ragionevole dubbio che forse tale aspetto dovrebbe essere maggiormente approfondito.

L'attuale assetto morfo-sedimentologico dell'area è però da considerarsi come una condizione di transizione verso un inevitabile riequilibrio idraulico tra i due bacini attigui, che, nel caso in cui lo scanno continui ad allungarsi, dovrebbe portare ad un approfondimento del canale ed ad uno spostamento dell'asse verso ovest. È ipotizzabile che la lenta ripresa del trasporto di fondo del Po ed il debole rallentamento degli abbassamenti del suolo, registrati negli ultimi decenni, pur continuando anche nei prossimi anni, non saranno sufficienti per modificare a breve termine l'attuale stile di crescita ramificata della freccia litorale.

L'argomento sviluppato presenta interessanti risvolti applicativi. Ogni anno sono spese cifre considerevoli per interventi atti al miglioramento della qualità delle acque ed al mantenimento dell'efficienza dei canali e delle bocche lagunari, che molto spesso si rivelano inefficaci per le mutate condizioni geo-ambientali. Solo un'approfondita conoscenza del contesto morfologico e della sua evoluzione futura può garantire una corretta scelta decisionale delle azioni da adottare.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano G. Calderoni per l'aiuto fornito nella revisione delle carte storiche, A. Zamariolo, A. De Nardo ed A. Bertoni per il supporto fornito durante i rilievi di campagna. Un doveroso ringraziamento va rivolto a M. Bondesan, S. Bencivelli, E. Mazzini, all'Ufficio Idrografico e Mareografico di Parma che in vario modo hanno agevolato la ricerca svolta.

Lo studio è stato condotto con finanziamenti della Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura (responsabile U. Simeoni), ex 60% (responsabile U. Simeoni) e del fondo COFIN 98 (responsabile R. Dal Cin) del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (M.U.R.S.T.).

## Bibliografia

- Aubrey D.G. e Gaines Jr. A.W. (1982) - *Rapid formation and degradation of barrier spits in areas with low rates of littoral drift*. Mar. Geol., 49: 257-278.
- Barbujani R. (1966) - *Nascita e sviluppo del Delta Padano*. "Padusa" Bollettino del Centro Polesano di studi storici, archeologici ed etnografici, 4: 3-15.
- Barbujani R. (1974) - *Nascita e sviluppo del Delta Padano*. La Garangola, Padova. pp. 51.
- Bondesan M. e Simeoni U. (1983) - *Dinamica e analisi morfologica statistica dei litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta*. Memorie di Scienze Geologiche, Padova, XXXVI: 1-48.
- Bondesan M. (1985) - *Quadro schematico dell'evoluzione geomorfologica olocenica del territorio costiero compreso tra Adria e Ravenna*. Atti della Tavola Rotonda "Il Delta del Po", Sez. Geologica, Regione Emilia-Romagna, Bologna, I. pp. 23-36.
- Boothroyd J.C. (1978) - *Mesotidal inlets and estuaries*. In: Davis R.A. (Editor), Coastal Sedimentary Environments. Springer-Verlag, Berlin. pp. 287-360.

- Carter R.W.G. (1988) *Coastal environments*. Academic Press, London, U K. pp. 617.
- Carter R.W.G. e Orford J.D. (1991) - *The sedimentary organisation and behaviour of drift-aligned barriers*. In: N.C. Kraus, K.J. Gingerich and D.L. Kriebel (Editors), *Coastal Sediments '91*. ASCE: 934-948.
- Dal Cin R. (1983) - *I litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta: caratteri tessiturali e dispersione dei sedimenti, cause dell'arretramento e previsioni sull'evoluzione futura*. Bollettino Società Geologica Italiana, 102: 9-56.
- Dal Cin R. (1994) - *Lo scannone di Goro nel Delta del Po: evoluzione morfologica e possibili interventi per conservare l'ambiente della laguna retrostante*. In: Bencivelli S., Castaldi N. & Finessi D. (Editors), *Sacca di Goro: Studio integrato sull'ecologia in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo - 2° anno di ricerche*. FrancoAngeli, Provincia di Ferrara, Milano, I. pp. 291-303.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1984) - *Variazioni volumetriche del delta padano nell'ultimo secolo, distribuzione dei sedimenti nei rami deltizi e caratteri granulometrici dei materiali cavati nel basso Po*. In: Atti del 2° Convegno di Idraulica Padana, Tecnografica, Parma, I. pp. 255-279.
- De Boer G. (1981) - *Spurn Point: erosion and protection after 1849*. In: J. Neale and J. Flenley (Editors), *The Quaternary in Britain*. Pergamon Press, Oxford, U K. pp. 206-215.
- Davis R.A. e Hayes M.O. (1984) - *What is a wave-dominated coast?*. *Marine Geology*, 60: 313-329.
- Fitzgerald D.M. (1988) - *Shoreline erosional-depositional processes associated with tidal inlets*. In: Aubrey D. G. and Weishar L. (Editors), *Lecture Notes On Coastal and Estuarine Studies*, 29. pp. 40.
- Galichon P. (1985) - *La formation des crochons sédimentaire: le cas de La Pointe d'Arçay (Vendée), France*. *Revue de Géologie Dynamique de Géographie Physique*, 26 (3): 163-171.
- Héquette A. e Ruz M.H. (1991) - *Spit and barrier island migration in the southeastern Canadian Beaufort Sea*. *Journal of Coastal Research*, 7(3): 677-698.
- Hequette A., Ruz M.H. e Hill P.R. (1995) - *The effects of the Holocene sea level rise on the evolution of the southeastern coast of the Canadian Beaufort Sea*. *Journal of Coastal Research*, 11(2): 494-507.
- Hubbard D.K., Nummedal D. e Oertel G. (1979) - *The role of waves and tidal currents in the development of tidal inlet sedimentary structures and sand body geometry: examples from N. Carolina, S. Carolina and Georgia*. *Journal of Sedimental Petrology*, 49(4): 1073-1092.
- Idroser (1983) - *Il trasporto solido fluviale nei bacini tributari dell'Adriatico. Regione Emilia-Romagna, Piano progettuale per la difesa della costa Emiliano-Romagnola*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp. 429.
- Idroser (1994) - *Aggiornamento ed integrazione del Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola. Relazione generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp. 276.
- Idroser (1996) - *Progetto di Piano per la Difesa dal Mare e la Riqualficazione Ambientale del Litorale della Regione Emilia-Romagna; Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp. 365.
- Kindson C. (1963) - *The growth of sand and shingle spits across estuaries*. *Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge Band*, 7(1): 1-22.
- King C.A.M. e McCullagh M.J. (1971) - *A simulation model of a complex recurved spit*. *Journal of Geology*, 79: 22-37.
- Komar P.D. (1976) - *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. pp. 429.
- Kraus N.C. (1999) - *Analytical model of spit evolution at inlets*. In: Kraus N.C. and McDougal W.G. (Editors), *Coastal Sediments '99*. ASCE. pp. 1739-1754.
- Kumar N. e Sanders J.E. (1974) - *Inlet sequence: a vertical succession of sedimentary structures and textures created by the lateral migration of tidal inlets*. *Sedimentology*, 21: 491-532.
- Losada M.A., Medina R., Vidal C. e Roldán A. (1991) - *Historical evolution and morphological analysis of "El Puntal" spit, Santander (Spain)*. *Journal of Coastal Research*, 7(3): 711-722.
- McBride R. e Byrnes M.R. (1997) - *Regional variations in shore response along barrier island systems of Mississippi river delta plain: historical change and future prediction*. *Journal of Coastal Research*, 13 (3): 628-655.

- Meistrell F.J. (1966) - *The spit-platform concept: laboratory observation of spit development*. Unpublished M.S. In: M.L. Schwartz (Editor), *Spits and bars*. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pennsylvania, USA, 1972. pp. 224-284.
- Oertel G. F. (1988) - *Processes of sediment exchange between tidal inlets, ebb deltas and barrier islands*. In: Aubrey D. G. and Weishar L. (Editors), *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlet. Springer-Verlag, Berlin, 29. pp. 297-318.
- Orford J.D., Carter R.W.G. e Jennings S.C. (1996) - *Control domains and morphological phases in gravel-dominated coastal barriers of Nova Scotia*. *Journal of Coastal Research*, 12 (3): 589-604.
- Raper J., Livingstone D., Bristow C. e Horn D. (1999) - *Developing process-response models for spits*. In: N.C. Kraus and W.G. McDougal (Editors), *Coastal Sediments '99*. ASCE. pp. 1755-1769.
- Riddell K.J. e Fuller T.W. (1995) - *The Spey Bay geomorphological study*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20: 671-686.
- Schwartz M.L. (Ed.) (1972) - *Spits and Bars*. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pennsylvania, USA. pp. 452.
- Simeoni U. e Bondesan M. (1997) - *The role and responsibility of man in the evolution of the Adriatic alluvial coasts of Italy*. In: F. Briand and A. Maldonado (Editors), *Transformations and evolution of the Mediterranean coastline*. Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la mer Méditerranée (CIESM), 18, Science Series n° 3. pp. 111-132.
- Simeoni U., Fontolan G. e Tessari U. (in preparazione) - *Morphogenesis and evolution of the Goro spits, Po Delta - Italy*.
- Simeoni U., Ciavola P., Fontolan G., Mazzini E. e Tessari U. (1998) - *Centennial evolution of a recurved spit: a case study from the spit of the Goro lagoon Po Delta (Italy)*. In: 35th CIESM Congress Proceedings, Dubrovnik (Croatie), 35. pp. 100-101.
- Uda T. e Yamamoto K. (1991) - *Spit formation in lake and bay*. In: N.C. Kraus, K.J. Gingerich and D.L. Kriebel (Editors), *Coastal Sediments '91*. ASCE. pp. 1651-1665.

Manoscritto ricevuto il 10/12/1999, accettato il 14/1/2000.

## Evoluzione dell'area di foce del Po di Goro

Carlo Del Grande<sup>1</sup> e Umberto Tessari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico Ambientali, Università di Bologna,  
Via Zamboni 67 - 40127 Bologna

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara,  
C.so Ercole I d'Este 32 - 44100 Ferrara

### Riassunto

Viene analizzata la morfologia della foce del Po di Goro mediante l'utilizzo di foto aeree, satellitari e carte topografiche nell'intervallo di tempo compreso tra il 1949 e il 1998. Il carattere spiccatamente asimmetrico, riconoscibile a partire dagli anni '50, è posto in relazione con l'andamento della subsidenza e con la variazione degli apporti solidi fluviali. Lo scenario osservabile dalla morfologia sommersa ed emersa dell'area di foce, mette in evidenza la forma particolare che la barra assume in relazione alla corrente litorale esistente, che interagisce con la corrente fluviale.

### Introduzione

Le condizioni che determinano l'attuale morfologia della foce sono da ricercarsi in due motivi fondamentali: la perdita di efficienza del Po di Goro in corrispondenza alla diminuzione degli apporti solidi ad iniziare circa dagli anni '50 in concomitanza dell'aumento dei tassi di subsidenza nello stesso periodo. La conseguenza principale di tali aspetti scaturisce in una dominanza degli agenti francamente marini. In particolare la corrente lungo costa diventa l'agente morfogenetico predominante e opera come principale fattore distributore e rimodellante dei sedimenti portati alla foce. In Figura 1 viene riportata un'immagine satellitare nella quale è evidente la direzione di propagazione principale degli apporti di sedimento dei vari rami deltizi del Po.

### Diminuzione degli apporti solidi e subsidenza

Le variazioni delle caratteristiche idrologiche del fiume e dell'efficienza dei suoi cinque rami deltizi hanno condizionato lo sviluppo del territorio. Le portate liquide complessive del Po, tra il 1918 ed il 1991, presentano valori compresi tra 902 e 2620 m<sup>3</sup>/s, con medie di 1496 m<sup>3</sup>/s. Eventi di piena eccezionali possono verificarsi con cadenza pluriennale (piene del 1907, 1917, 1926, 1928), oppure nello stesso anno (maggio e novembre 1926) o nello stesso mese (novembre 1976). Sulla base dei dati disponibili (Idroser, 1994) non si evidenziano, nell'ultimo secolo, cospicue variazioni nella ripartizione delle acque tra i vari rami deltizi del Po.

Fino alla metà del 1900 vi è stato, per l'abbondanza degli apporti solidi, un accentuato protendimento in mare dell'area deltizia.

Nei decenni successivi s'instaura però una brusca inversione di tendenza determinata dal diminuito trasporto solido del Po: si passa da 12.8 Mt/y del periodo 1918-43 ai 4.7 Mt/y del 1986-91 (Simeoni et al., 1998). Sulla diminuzione degli apporti ha influito principalmente il prelievo d'inerti asportati dall'alveo del fiume (Bondesan e Dal Cin, 1975; Simeoni e Bondesan, 1997). Secondo alcune stime (Dal Cin, 1983) nel periodo 1958-1981 sarebbero stati effettivamente cavati dagli alvei del bacino del Po circa 700 Mm<sup>3</sup> di materiale, costituito in assoluta prevalenza da sabbie e ghiaie (Dal Cin e

Simeoni, 1984). Nel solo tratto terminale del fiume nel periodo 1951-1981 sarebbero stati asportati 90-95 Mm<sup>3</sup> di materiale sabbioso (Fig. 2). I fenomeni di abbassamento del suolo verificatisi nel territorio deltizio durante il XX Secolo sono da ascrivere sia a cause naturali, sia all'attività antropica. La subsidenza naturale sul margine della piana costale-deltizia è riconducibile essenzialmente alle strutture geologiche profonde, alla neotettonica ed alla compattazione dei terreni, in particolare delle argille. Durante il Quaternario si sono accumulati da 2000 a 3000 metri di sedimenti in un ambiente neritico-litorale in un bacino con una profondità di circa 100 metri (Selli, 1949; 1967). In questo lasso di tempo la subsidenza naturale ha prodotto un affondamento di entità equiparabile allo spessore dei sedimenti accumulati. Quindi, sulla base di questi dati, si può stimare che negli ultimi 2500 anni la subsidenza dell'area del delta del Po sia stata di circa 3 metri (valore medio; Ciabatti, 1966). Gli abbassamenti calcolati per la porzione orientale del territorio ferrarese si aggirano tra 1 e 2 mm/anno (Bondesan, 1988).



Figura 1 - Il Delta del Po ripreso dal satellite Nimbus nel 1984.

Tali valori non sono nemmeno raffrontabili con quelli riscontrati negli anni '50 e '60: infatti questi ultimi sono di entità assai maggiore, e da attribuirsi fondamentalmente ad una serie di cause antropiche:

- Abbassamenti del livello della falda freatica, collegati alle operazioni di bonifica, ad emungimenti e drenaggi di eccessiva entità, ad impermeabilizzazioni del terreno su vaste aree.
- Alterazioni del chimismo delle acque sotterranee causate dall'ingressioni di acque marine nella falda freatica, eccessive irrigazioni, dispersioni nel suolo di acque reflue dei centri urbani.
- Estrazioni di acque e di gas da falde profonde su vaste aree dalla bassa pianura padana, che sono state sottoposte ad emungimenti (per uso agricolo) di acque da falde sottostanti la falda freatica. E', però, stata soprattutto l'estrazione di acque metanifere dai giacimenti quaternari, praticata in questi territori fra il 1938 ed il 1961, a provocare gli abbassamenti maggiori.
- Fenomeni di subsidenza da sovraccarico dovuti agli agglomerati urbani, grandi rilevati, argini ed altri manufatti di un certo peso.

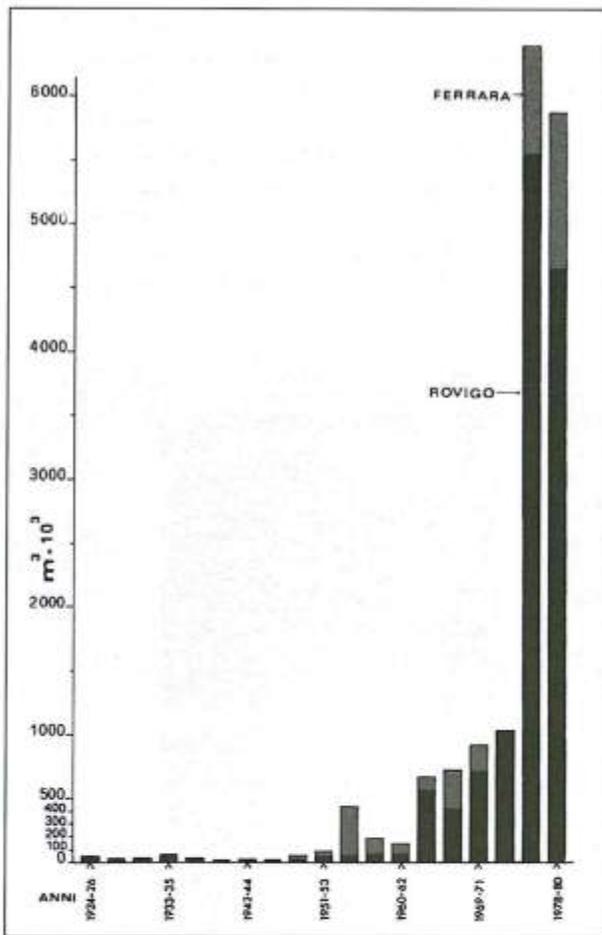


Figura 2 - Estrazione di materiali inerti in alveo per il fiume Po (da Dal Cin, 1983, mod.).

E' comunque da rilevare una forte riduzione della subsidenza indotta occorsa negli ultimi vent'anni, grazie soprattutto alla cessazione dell'attività estrattiva di acque metanifere nell'area. Attualmente gli abbassamenti maggiori (Fig. 3), dovuti principalmente alla presenza di sedimenti in via di costipamento o alla riduzione dei volumi dei terreni prosciugati di recente, si riscontrano nella porzione sud-orientale del delta, in corrispondenza della penisola del Po di Goro, di Donzella e di Tolle (Bondesan et al., 1990).

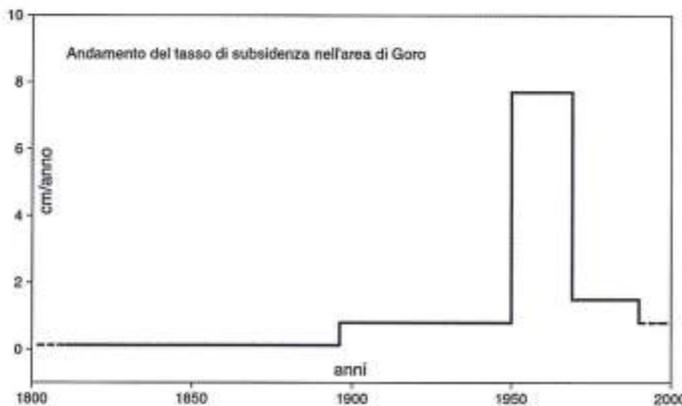


Figura 3 - Andamento del tasso di subsidenza limitatamente all'area di Goro per il periodo tra il 1811 e il 1996.

### Corrente litorale

Uno dei fattori responsabili della particolare forma della foce è rappresentato dalla corrente che persiste lungo questo tratto di costa. Da una elaborazione d'immagine applicata ad esempio alle foto aeree del 1992 e del 1998, nella quale vengono messe in rilievo le variazioni cromatiche legate alla concentrazione del sedimento in sospensione (Figg. 4 e 5), è possibile ricavare ulteriori conferme, oltre a quelle reperibili in bibliografia (Dal Cin, 1994, Idroser, 1984), della presenza di una corrente lungo costa con direzione NNE-SSO che appare dalla curvatura del *plume* davanti al Po di Goro che risulta più o meno accentuata ma sempre verso la destra della foce (Fig. 6). Nella Figura 5 è, altresì, evidente come la direzione di dispersione del flusso uscente dal canale artificiale posto in destra foce sia concorde con quella della corrente litoranea.



Figura 4 - Foto aerea del 1992.



Figura 5 - Foto aerea del 1998.

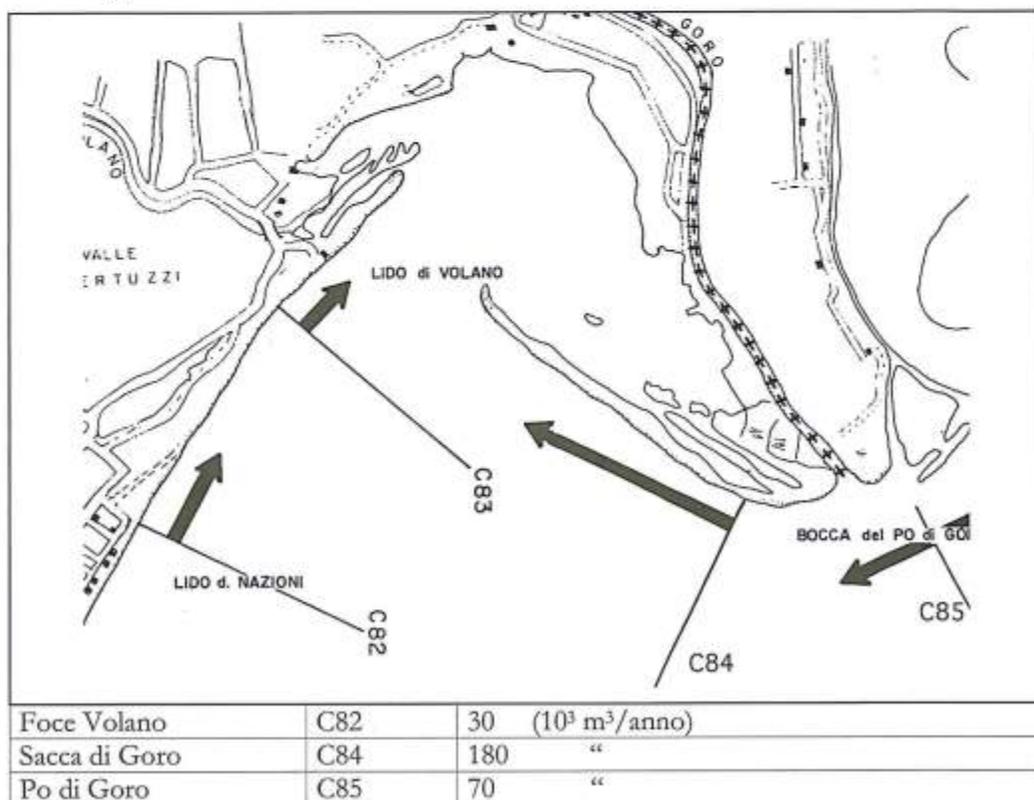


Figura 6 - Schema che indica la direzione e la stima del trasporto solido litoraneo: valore del trasporto medio annuo (IDROSER, 1984, mod.).

### Evoluzione della foce

L'analisi delle foto aeree fornisce un utile strumento per osservare la variazione morfologica della foce dal 1949 al 1998. Lo sviluppo asimmetrico della foce è uno degli aspetti più evidenti. Questo fenomeno comincia ad apparire dagli anni 50 come mostrano le foto aeree del 1949 (Fig. 7) e del 1955 (Fig. 8). La geometria considerata diventa ancora più evidente durante le due successive decadi (Figg. 9, 10 e 11). L'ultimo decennio (Figg. 12, 13 e 14) riporta un andamento concorde a quello indicato mettendo però in evidenza una minore variabilità, sempre nell'ambito della geometria asimmetrica, che è da ricercare in un ulteriore calo dell'efficienza del Po di Goro.

L'asimmetria morfologica della foce del Po di Goro è dovuta, principalmente, al continuo accrescimento della spiaggia sul lato sopra corrente con conseguente avanzamento della linea di riva verso mare. Sul lato sotto corrente la posizione arretrata della linea di riva è conseguenza della diminuzione degli apporti solidi del Po di Goro riscontrata negli ultimi decenni, soprattutto dovuta all'ingente estrazione di materiali inerti in alveo (Fig. 2).



Figura 7 - Foto aerea del 1949 IGM.



Figura 8 - Foto aerea del 1955 IGM.

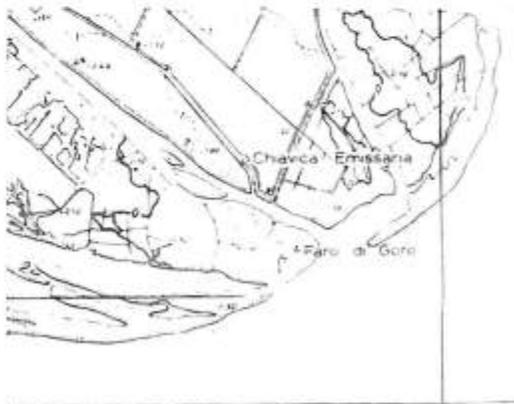


Figura 9 - Particolare della foce tratto dalla Tavoletta IGM 1964.



Figura 10 - Foto aerea del 1977 (Regione Emilia Romagna CTR).



Figura 11 - Foto aerea del 1980 (Atlante costa ER).



Figura 12 - Foto aerea del 1992 (Terraserver).

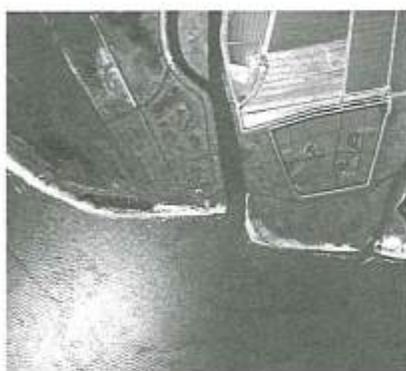


Figura 13 - Foto aerea del 1995 (Provincia di Ferrara).



Figura 14 - Foto aerea del 1998 (Lab Gis.)

### Morfologia della barra di foce

Nelle Figure 15 e 16 sono riportati due rilievi batimetrici che mostrano l'assetto del fondale in due anni diversi; il quadro composto ha permesso di avere informazioni sulla morfologia sommersa della foce e conoscere l'andamento delle isobate fino a circa 6 m di profondità.

In entrambe le figure è mappata anche la posizione della soglia dell'alveo fluviale che risulta molto ripida raggiungendo velocemente la profondità di 4 metri che diventano 5 in prossimità della prima isola fluviale (Fig. 16). In prossimità della foce del Po di Goro (Fig.15) si osserva come la barra di foce assuma una forma stretta ed allungata verso Sud - Ovest e termini in un'area in cui il fondale è molto irregolare. La presenza di barre in questa posizione può essere indicativa dell'attività del sistema foce-freccie litorali.

Si osserva un andamento irregolare anche sul versante esterno (verso mare) della barra di foce che termina in corrispondenza dell'isobata dei 3.5 metri. Al di sotto dei 4 m di profondità si nota come il fondale assuma un andamento più regolare: la fascia più profonda, infatti, è meno soggetta rispetto alle altre a variazioni significative dovute alle correnti lungo costa e all'effetto del moto ondoso.

Utilizzando gli elementi della morfologia subacquea e subaerea possono essere individuate le logiche che ne determinano l'assetto.

Nella situazione in esame, la barra di foce sommersa, costruita dai sedimenti fluviali, sembra funzionare, in maniera del tutto paragonabile all'azione delle similari strutture artificiali, da "pennello" bloccando il sedimento nel lato sopra corrente. Komar (1973), usando un modello di simulazione al computer, in una situazione di questo genere, ha concluso che il fiume funziona da barriera per le

sabbie trasportate dalla corrente lungo costa comportandosi effettivamente come un pennello, non permettendo inoltre alla barra di foce di espandersi verso il lato sopra corrente.

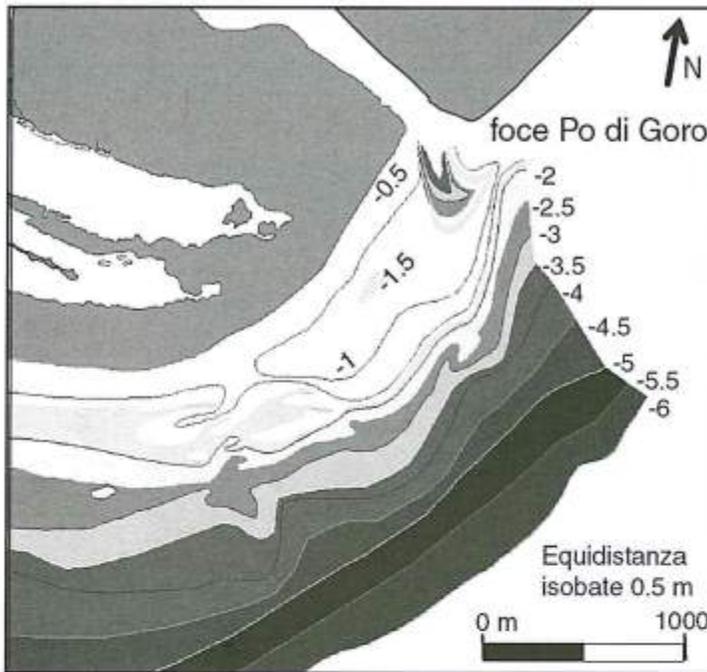


Figura 15 - Batimetria 1998 dell'area di foce.

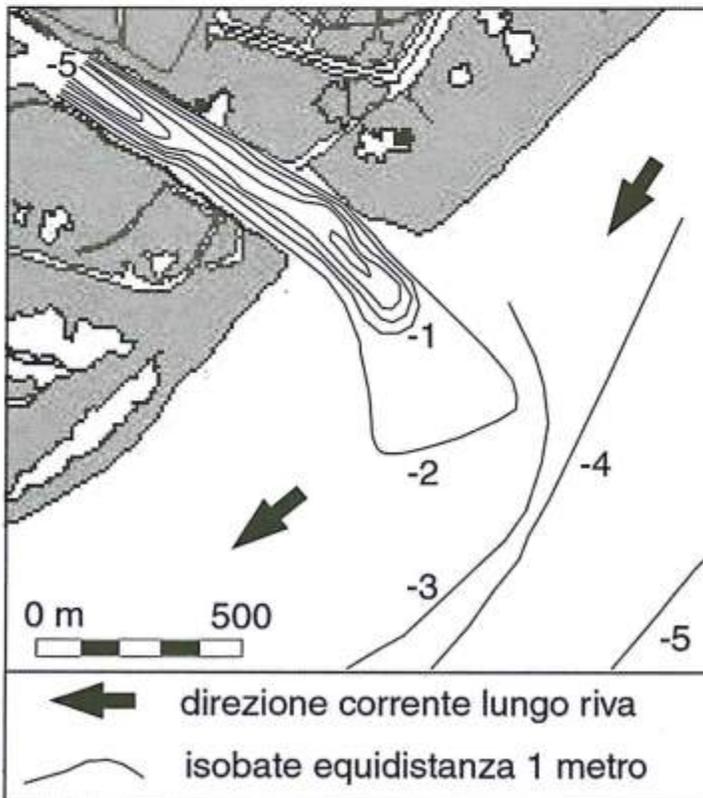


Figura 16 - Rilievo batimetrico 1996.

Il getto della corrente fluviale del ramo di Goro determina uno sbarramento fisico per la corrente lungo costa che conferisce alla barra di foce una forma inizialmente allungata sul lato sovracorrente che successivamente si piega verso sud-est. Questo fenomeno è chiamato "effetto pennello" in quanto presenta caratteristiche analoghe a quelle delle barriere artificiali di protezione costiera. Il rimaneggiamento della barra di foce determina la formazione di isole o cordoni sabbiosi che hanno come origine la riva destra della foce (Fig. 17): il sistema di frecce litorali che costituiscono lo scannone di Goro.



Figura 17 - Foto aerea del 1994 (Provincia) da cui è visibile una chiara asimmetria della foce e la curvatura del flusso fluviale.

## Conclusioni

Gli aspetti considerati nell'analisi della morfologia della foce del ramo di Goro, mettono in luce come si sia instaurata dall'inizio degli anni '50 una dinamica che rimane complessivamente inalterata. Il risultato che ne deriva è costituito da una marcata asimmetria della foce.

Le condizioni che hanno innescato quest'assetto sono da ricercarsi nell'andamento della subsidenza registrata nell'area meridionale del Delta del Po durante la seconda metà del secolo scorso e dalle stime riguardanti l'attività estrattiva e il trasporto solido fluviale.

La somma delle condizioni "negative" indotte dalla subsidenza e dal diminuito apporto solido fa sì che la morfologia della foce abbia un controllo marino dominante: infatti l'aumento della ricettività sedimentaria che non viene compensata, non permette al fiume di contrastare i processi costiero-marini, in particolare le correnti sottocosta e la conseguente deriva litoranea.

Sulla sinistra foce (sopracorrente) si manifesta una progradazione maggiore rispetto alla destra (sottocorrente). Il lato sopra corrente è caratterizzato da una spiaggia che presenta un maggiore equilibrio rispetto all'altro, sotto corrente, il quale è invece caratterizzato da una spiaggia molto ridotta interessata da fenomeni di erosione piuttosto che deposizione. Questa condizione ha determinato, per la salvaguardia di questo tratto di costa in cui è sito il Faro di Gorino, la necessità mettere in atto opere di protezione ad iniziare dalla fine degli anni '70 (Idroser, 1994).

La presenza di una barra ben sviluppata, orientata verso sud-ovest, determina il perdurare della spiccata asimmetria della foce e controlla l'alimentazione sedimentaria della porzione orientale dello Scanno, mantenendo al contempo un'alimentazione indipendente del lato in sinistra della foce, che trae sedimento dalla redistribuzione lungo costa degli apporti provenienti dal Po di Donzella e, secondariamente, dal Po di Tolle.

**Bibliografia**

- Bondesan M. (1988) - *Aspetti e problemi geomorfologici del territorio deltizio padano: 2a Escursione - Delta del Po*. In: Bondesan M., Elmi C., Nesci O., Dal Cin R. e Veggiani A. (a cura di), Guida alle escursioni. Gruppo Nazionale di Geografia Fisica e Geomorfologia, riunione annuale: Riccione - Delta del Po, 21-24 giugno 1988. pp. 31-58.
- Bondesan M. e Dal Cin R. (1975) - *Rapporti fra erosione lungo i litorali emiliano-romagnoli e del delta del Po e attività estrattiva negli alvei fluviali*. In: Cave e assetto del territorio, Italia Nostra - Regione Emilia Romagna. pp 127-137.
- Bondesan M., Minarelli A. e Russo P. (1990) - *Analisi dei movimenti verticali del suolo avvenuti nel periodo 1970-1978 lungo l'asta del Po ad est di Polesella e nel delta*. In: PO AcquAgricolturaAmbiente, vol 2°: L'alveo e il delta; Il Mulino Ed., Bologna. pp. 385-407.
- Ciabatti M. (1966) - *Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano*. Giornale di Geologia, XXXIV, fascicolo II: 1-27.
- Dal Cin R. (1983) - *I litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta: caratteri tessiturali e dispersione dei sedimenti, cause dell'arretramento e previsioni sull'evoluzione futura*. Boll. Soc. Geol. It., 102: 9-56.
- Dal Cin R. (1994) - *Lo scannone di Goro nel Delta del Po: evoluzione morfologica e possibili interventi per conservare l'ambiente della laguna retrostante*. In: Bencivelli S., Castaldi N. & Finessi D. (a cura di) Sacca di Goro: Studio integrato sull'ecologia in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo - 2° anno di ricerche, FrancoAngeli Ed., Provincia di Ferrara. pp. 291-303.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1984) - *Variazioni volumetriche del delta padano nell'ultimo secolo, distribuzione dei sedimenti nei rami deltizi e caratteri granulometrici dei materiali cavati nel basso Po*. In: Atti del 2° Convegno di Idraulica Padana, Parma 15-16 luglio 1984. pp. 255-279.
- Idroser (1984) - *Piano progettuale per la difesa della costa Adriatica, Emiliano-Romagnola*. Regione Emilia Romagna, vol. II-III-IV, pp. 636.
- Idroser (1994) - *Aggiornamento ed integrazione del Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola*. Relazione generale, Regione Emilia-Romagna, Bologna. 276 pp.
- Komar P. D. (1973) - *Computer Models of Delta Growth Due to Sediment Input from Rivers and Long-shore Transport*. Geological society of America Bulletin, 84: 2217-2226
- Selli R. (1949) - *Le conoscenze geologiche sul quaternario gassifero del polesine e del ferrarese settentrionale*. Estratto dagli atti del convegno nazionale per il metano, Padova 14-16 giugno. Succ. Penada Stampatori, Padova. pp. 26.
- Selli R. (1967) - *The Pliocene-Pleistocene boundary in italian marine sections and its relationship to continental stratigraphies*. In "Progress in oceanography" (volume 4). Pergamon Press - Oxford & New York. pp.67-86.
- Simeoni U., Ciavola P., Fontolan G., Gabbianelli G., Mazzini E., Tessari U. e Zamariolo A. (1997) - *Evoluzione dello Scannone di Goro (Delta del Po)*. In: Abstracts of GEOITALIA 97-FIST, CLEUP Ed., Padova. pp.43-44.
- Simeoni U., Borghesi A., Calderoni G., Ciavola P., Fontolan G., Gatti M., Gonella M., Tessari U. e Zamariolo A. (1998) - *Analisi previsionale dell'evoluzione dello Scanno e della Sacca di Goro. Relazione finale*. R.E.R., Ass. Agricoltura, Servizio Sviluppo Agro-alimentare, Bologna. pp 273.

Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 20/3/2000.

## Un bacile di nome Delta

Umberto Simeoni<sup>1</sup>, Giovanni Gabbianelli<sup>2</sup>, Umberto Tessari<sup>1</sup>,  
Giovanni Calderoni<sup>1</sup> e Carlo Del Grande<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara  
C.so Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara

<sup>2</sup>Lab. GIS- Scienze Ambientali, Università di Bologna, via degli Ariani, 1- 48100 Ravenna

### Riassunto

L'evoluzione del delta del Po è caratterizzata dalla successione e dalla sovrapposizione d'eventi ambientali complessi cui va sommata, specie negli ultimi secoli, l'azione modificatrice indotta dall'uomo. L'analisi delle vicende storiche del Po e del suo apparato deltizio consentono d'individuare le principali cause dei fenomeni erosivi che, attorno agli anni '50, si sono instaurati lungo il litorale.

I notevoli abbassamenti del suolo, l'irrigidimento dei reticoli idrografici, l'approfondimento degli alvei di vasti tratti del fiume e la drastica riduzione delle portate solide del Po hanno contribuito a far assumere al delta moderno una caratteristica forma a bacile, con i bordi elevati verso mare e una vasta depressione al centro.

L'incremento previsto del livello del mare per i prossimi anni, con una conseguente variazione del clima meteo-marino, e lo smantellamento delle difese naturali della costa (dune, scanni, ecc.) metterà sempre più a rischio d'ingressione marina vaste aree del territorio deltizio. Tutto ciò renderà ancora più complessa la già difficoltosa gestione di questo territorio, che presenta emergenze naturali uniche o quantomeno assai rare per l'Italia.

### Introduzione

Lo sviluppo del sistema deltizio del Po negli ultimi quattro secoli è legato soprattutto alle notevoli quantità di materiale portate a mare dal fiume, durante una fase di sensibile peggioramento climatico (1500- 1850 A.D. circa o "Piccola Età del Ghiaccio"; Denton e Karlen, 1973; Veggiani, 1984; Bradley e Jones, 1992). La sua morfologia è stata tuttavia condizionata da sempre maggiori condizionamenti antropici, volti in primo luogo a preservare la laguna veneta dall'interrimento (Maestri, 1981; Simeoni e Bondesan, 1997). Oggi la prominenza del Delta inizia a pochi chilometri a sud di Adria, si protende a mare per circa 25 km su un arco meridiano di circa 90 km ed occupa una superficie di circa 400 km<sup>2</sup>.

Il fiume Po, dopo oltre 600 km di corso, fraziona, nel delta, le sue acque in cinque rami principali (rispettivamente, da nord a sud, di Maestra, Pila, Tolle, Donzella o Gnocca e Goro; cui corrispondono altrettanti sistemi deposizionali di piana e fronte deltizia (Fig. 1a). I litorali dell'area deltizia sono sostanzialmente caratterizzati da sistemi di cordoni e barre, talora connesse all'evoluzione di estese frecce litorali, che bordano ampie aree lagunari retrostanti, oggi intensamente antropizzate. Un'ampia zona di prodelta sommerso, che si estende in mare sino ad un massimo di 6 km nella parte settentrionale e 10 km in quella centro-meridionale, chiude infine l'apparato deltizio.

Questo peculiare assetto è stato raggiunto dal sistema attraverso processi e dinamiche litorali-costiere succedutesi non solo tempo ma, così come ricostruita con buon dettaglio da numerosi au-

tori (Ciabatti, 1967; Veggi e Roncuzzi, 1970; Bondesan et al. 1990, 1995; Carbognin et al. 1984) su un territorio notevolmente più vasto dell'attuale, all'incirca compreso tra Ravenna, Chioggia e Pontelagoscuro

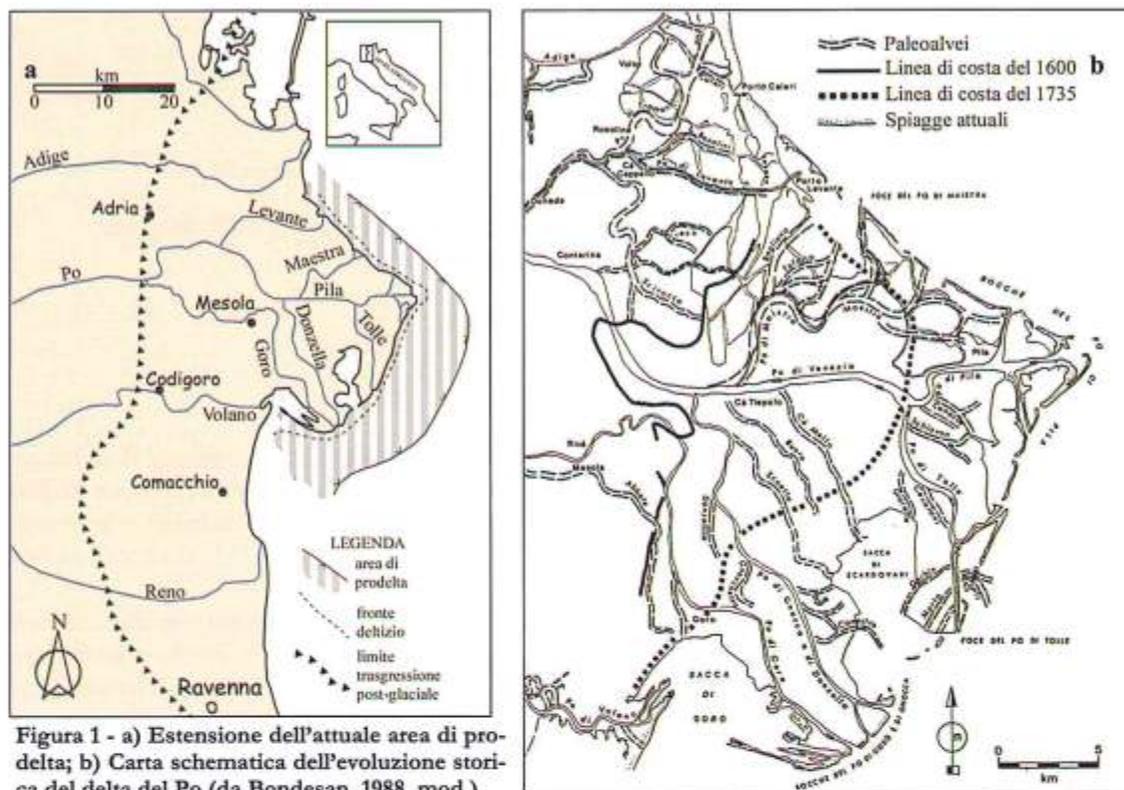


Figura 1 - a) Estensione dell'attuale area di prodelta; b) Carta schematica dell'evoluzione storica del delta del Po (da Bondesan, 1988, mod.).

Il lavoro dopo aver schematicamente tratteggiati i principali lineamenti evolutivi del sistema analizza i principali fattori che ne hanno caratterizzato lo sviluppo nell'ultimo mezzo secolo e che, probabilmente, condizioneranno la sua futura evoluzione.

### Evoluzione storica del Delta

L'evoluzione del delta del Po è caratterizzata dalla successione e dalla sovrapposizione di complessi processi geologico-sedimentologici su cui è andata a sommarsi, specie negli ultimi secoli, l'azione modificatrice operata dall'uomo. La linea di costa olocenica (all'incirca 6 Ka dal presente), connessa alla fase di massima trasgressione marina, ubicata all'incirca 20 km ad ovest dell'attuale nei pressi di Mezzogoro e a 4 km a W di Cervia, si è spostata progressivamente verso est (Fig. 1b), assumendo conformazioni via via differenti in funzione dell'efficienza delle foci fluviali e dell'azione del mare (Ciabatti, 1967; Veggi, 1968; Bondesan et al. 1990, 1995)

Una prima grande biforcazione del Po, risalente alla tarda età del Bronzo (~ 3000 anni fa) e localizzata in prossimità di Guastalla, bassa pianura reggiana, portò alla formazione di due rami: il più settentrionale sfociava all'altezza di Adria e quello meridionale in prossimità di Spina. Questo assetto idrografico, più in particolare, si sviluppa in concomitanza di un notevole peggioramento climatico globale conosciuto come "espansione glaciale di Lobben" (Denton e Karlen, 1973). A queste mutate condizioni climatiche, che hanno determinato un incremento dell'intensità e della frequenza degli alluvionamenti, è, probabilmente, da attribuire anche la pressoché totale scomparsa nell'area degli insediamenti dell'Età del Ferro (tardo proto- e inizio villanoviano; Veggi, 1994; Ciabatti e Veggi, 1997).

Molto probabilmente già in epoca etrusca, le acque, via via convogliate verso il ramo meridionale, portarono ad una maggiore efficienza del Po di Spina che, a sua volta, si riorganizzò, in prossimità di Ferrara, in due ulteriori rami: l'Olana (poi Po di Volano) ed il Padoa, da cui il nome Po, noto anche come Eridano (Bondesan, 1988; Veggi e Roncuzzi, 1970; Ciabatti, 1967; Fabbri, 1985, 1994). Questa conformazione idrografica, che si mantenne pressoché immutata per tutto il periodo romano, sostanzialmente d'ottimo climatico, portò alla formazione di un ampio delta cuspidato. Esso si estendeva da Ravenna a Comacchio e, unico tra i tanti succedutesi nei secoli, giunse a protendersi in mare oltre 2-3 km dall'attuale linea di costa.

La sua cuspidate fu completamente erosa dal mare dopo il VII-VIII secolo d.C. ma alcune testimonianze connesse alla sua formazione (incisioni sepolte, impregnazioni gassose, ecc.) si possono ancora registrare nell'antistante area marina (Elmi et al., 1995; Gabbianelli e Elmi, 1997; Regione Emilia-Romagna, 1999). Nell'area emersa le testimonianze di questo apparato sono fornite dai numerosi paleoalvei e cordoni litoranei fossili rinvenuti tra Spina e Comacchio (Ciabatti, 1967; Veggi e Roncuzzi, 1970; Lenzi, 1993).

Contemporaneamente nell'Olana si sviluppava un'importante diramazione, che sfociava nei pressi di Mesola, chiamata "Gaurus" e da cui deriva l'attuale toponimo di Goro.

Con la fine del peggioramento climatico medievale, databile tra il 476 ed il 750 d.C. (o "Göschener 2"; Veggiani, 1994) e, soprattutto, con la rotta di Sermide avvenuta nel VIII secolo d.C. l'area assume un nuovo assetto idrografico; il corso più settentrionale cattura il ramo meridionale conferendogli maggior portata e determinando la progressiva decadenza dei corsi fluviali in territorio veneto.

In epoca tardo-medioevale particolarmente evidente è il protendimento delizio del Po di Volano (delta di Pomposa-Volano), accresciutosi di circa 7,5 km rispetto al periodo etrusco-romano (Ciabatti, 1967). Successivamente ad una serie di rotte fluviali, avvenute nel XII secolo presso Ficarolo, la maggior parte delle acque del Po s'incanala a nord, dando origine ad un'ampia piattaforma deliziosa.

Dopo il XII secolo la maggior parte delle acque del Po si riversava in un alveo coincidente all'incirca con l'attuale Po Grande (o Po di Venezia) fino alla biforcazione, nei pressi di Cavanella Po, dei rami di Ariano (a meridione) e delle Fornaci (a settentrione). Uno dei rami si divideva nel Po di Goro e nel Po dell'Abate, mentre l'altro dava origine al Po di Levante, di Scirocco e di Tramontana (Ciabatti, 1967).

Grazie alla loro attività si sviluppa, in epoca rinascimentale, un vasto delta. Tra il 1598 ed il 1604 i tecnici veneziani, temendo che i sedimenti scaricati in mare dai rami del Po delle Fornaci provocassero l'interrimento delle bocche della Laguna Veneta, deviarono il Po verso l'antica Sacca di Goro, che andò perciò progressivamente interrendosi (Fig. 2).

Con quest'opera, indicata come Taglio di Porto Viro (o Taglio Novo o Taglio di Po e con il successivo completo sbarramento del Po delle Fornaci avvenuto tra il 1612 ed il 1648 (Ciabatti, 1967; Maestri, 1981), viene del tutto escluso dalla rete idraulica il "delta rinascimentale" ed ha inizio la formazione del "delta moderno" ad opera del preesistente Po di Goro e dei nuovi rami di Gnocca, Tolle, Pila e Maistra, oltre a quelli, oggi estinti, di Donzellina, Scoetta, Ca' Mello, Bagliona, ecc.

Nel frattempo, anche per il peggioramento climatico connesso alla "Piccola Età del Ghiaccio" (1500- 1850 circa), aumentarono significativamente rotte ed alluvionamenti, tanto che si ritornò ad un ampio impaludamento dei territori di pianura emiliano-romagnoli.

L'incremento delle portate solide del fiume determinò, nella seconda metà del XVI secolo, un generalizzato interrimento degli spazi portuali dell'epoca (Veggiani, 1994).

Fino al 1800 è il Po della Maistra a rimanere il ramo più efficiente del delta (Ciabatti, 1967), mentre alcuni dei rami secondari, quello della Donzella e di Tolle scompaiono tra la fine del '700 e l'inizio dell'800. Sono di questo periodo i primi accenni cartografici di un'insenatura a ridosso del Po di Goro (Fig. 3), che andrà sviluppandosi prima come Rada di Goro e, successivamente, nell'omonima Sacca. Dopo la piena del 1872, il Po della Pila diviene il ramo principale dando inizio alla configurazione lobata, che tuttora persiste.

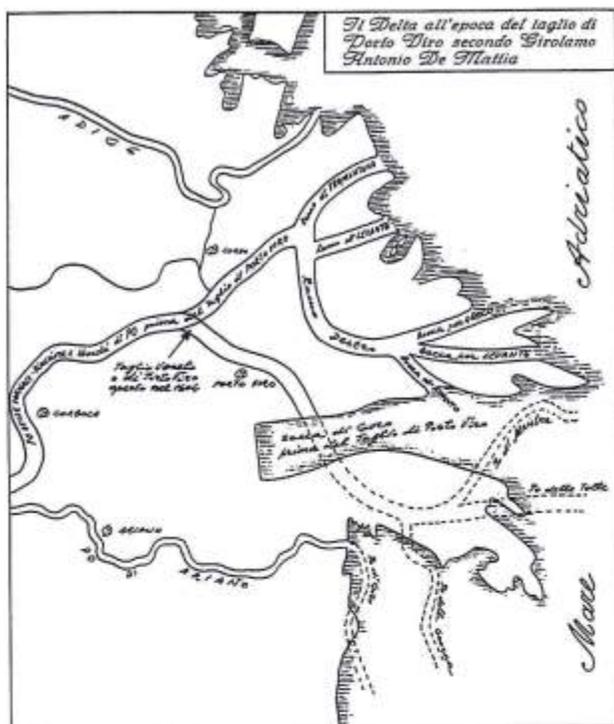


Figura 2 - Carta corografica del Delta all'epoca del Taglio di Porto Viro, disegnata da Gerolamo Antonio De Maria (da Barbujani, 1966 - mod.)

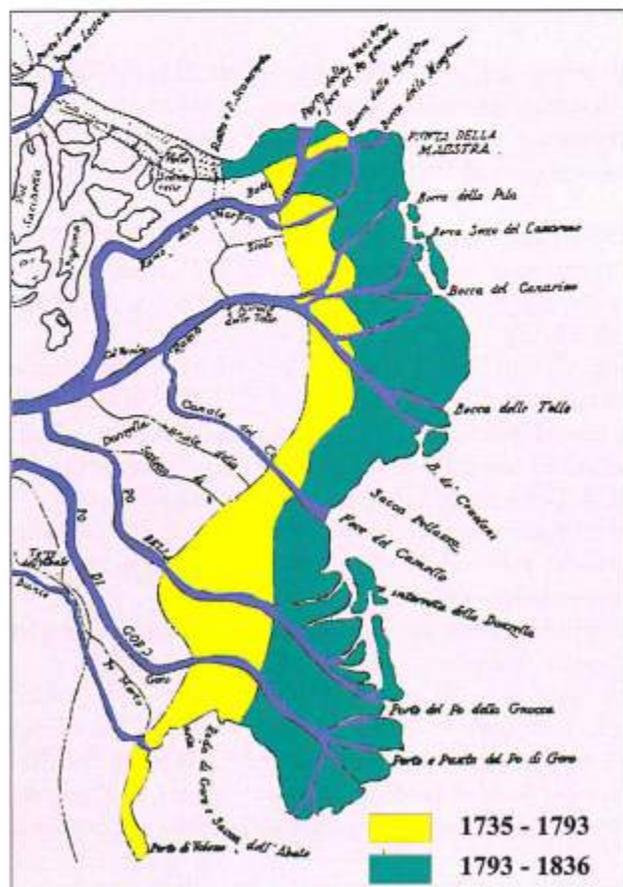


Figura 3 - Le bocche del Po nel 1836 disegnata dall'Ing. Tommaso Barbantini su una corografia dell'Em.<sup>mo</sup> e Rev.<sup>mo</sup> Principe Sig. cardinale Tommaso Arezzo Vescovo di Sabina, Legato della città di Ferrara (da Barbujani, 1974, mod.). Con diversi colori sono poste in evidenza le aree di avanzamento del Delta tra il 1735 ed il 1836.

## Il Po

Il Po, il maggiore fiume italiano, ha una lunghezza di Km 652 ed un bacino idrografico di 70.091 Km<sup>2</sup>. Esso viene considerato chiuso alla sezione di Pontelagoscuro (Ferrara), poiché a valle di questa località non vi sono significativi apporti liquidi da parte di affluenti.

Le portate liquide del Po (1918-96) vanno da un minimo di 902 ad un massimo di 2620 m<sup>3</sup>/s; la media del periodo considerato è di 1496 m<sup>3</sup>/s. Da uno studio condotto sul periodo 1918-1981 (Dal Cin, 1983) emerge una tendenza ad un aumento delle portate massime (Fig. 4). Rossetti e Raffa (1973) riscontrano lo stesso fenomeno per le portate al colmo e ritengono che tale aumento sia imputabile alla diminuita capacità ricettiva degli alvei del Po e dei suoi affluenti. Tale diminuzione sarebbe stata causata dalla riduzione artificiale delle aree destinate all'espansione dei massimi deflussi. Al contempo le portate minime mensili mostrano una tendenza alla diminuzione nel tempo per l'aumentato prelievo d'acqua, nei periodi estivi, per usi agricoli ed industriali.

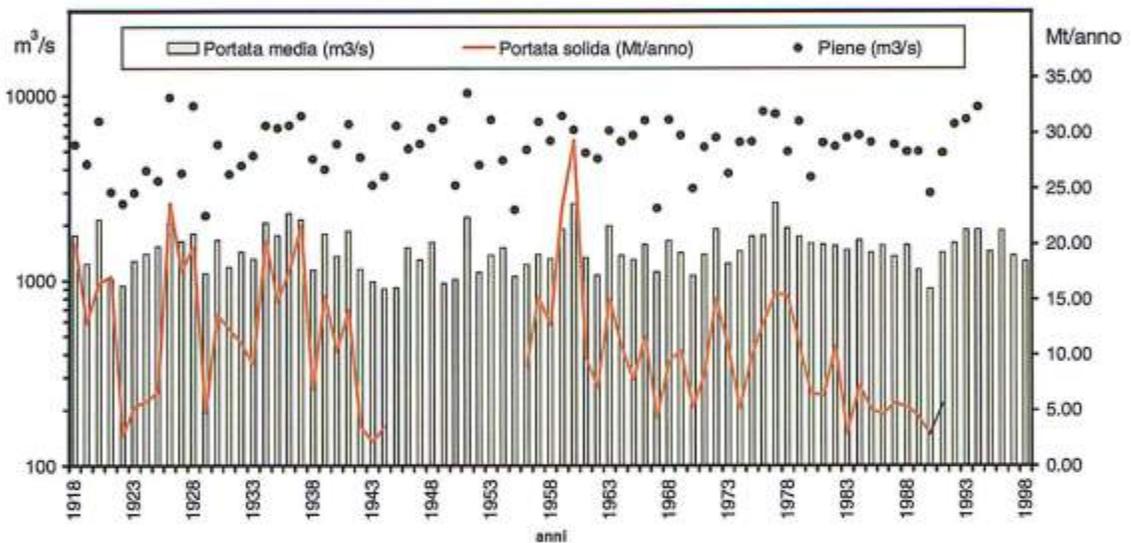


Figura 4 - Portata media, solida ed eventi di piena per il fiume Po dal 1918 al 1988. Le serie non sono complete per mancanza di dati.

In merito alla ripartizione della portata liquida nei vari rami del Delta esistono in letteratura numerosi dati stimati (Visentini, 1940; Canali, 1959; Tonini, 1975; ENEL, 1980; Idroser, 1996) od ottenuti attraverso simulazioni matematiche (Tomasino e Dazzi, 1975). Dal confronto fra questi studi, Dal Cin (1983) suggerisce che nel corso di questo secolo non vi siano state cospicue variazioni nella ripartizione delle acque nei vari rami deltizi.

L'analisi dell'andamento delle piene pone in rilievo che le piene catastrofiche per il basso Po si possono verificare soltanto se interviene l'apporto di tutto o della maggior parte del bacino imbrifero padano. Esaminando le caratteristiche delle diverse magre e piene conosciute, apparentemente sembra che il Po abbia assunto sempre più carattere torrentizio, con tendenza alla diminuzione delle portate di magra ed aumento di quelle di piena.

Escludendo l'ipotesi di un innalzamento del letto fluviale a Pontelagoscuro e considerando che, almeno nell'ultimo secolo, gli eventi meteorologici non hanno segnato un'analogia progressione, è da ritenersi che l'aumento dei livelli di piena dipenda dal progressivo miglioramento delle difese. Gli eventi di piena possono verificarsi a breve distanza di tempo (piene del 1907, 1917, 1926, 1928), oppure possono avvenire nello stesso anno (maggio 1926-novembre 1926) o nello stesso mese (novembre 76).

Per quanto riguarda il trasporto torbido la stazione di Pontelagoscuro è estremamente importante perché tutto il materiale che da lì transita può arrivare a mare (Visentini, 1940; Nelson, 1970). Tra il

1918 ed il 1944 il deflusso torbido e la torbidità specifica non hanno manifestato variazioni significative (Dal Cin, 1983), pur evidenziando oscillazioni più o meno cicliche (periodi 1918-25, 1926-33, 1934-44). Tra i periodi 1918-44 e 1956-73 vi è stata una riduzione del trasporto torbido medio annuo, passato da 12,53 milioni di t a 11,91 Mt.

La distribuzione nei vari rami deltizi del materiale in sospensione mette in evidenza come: la massima parte passi per il Po di Pila, l'apporto del Po di Maistra sia assai scarso ed, infine, come Tolle, Gnocca e, in minor misura, Goro presentino un trasporto solido simile.

La quantità del materiale trasportato sul fondo può essere solo stimata, visto che non sono disponibili dati sperimentali. Secondo Visentini (1940) il trasporto sul fondo rappresenta il 15% del trasporto in sospensione, Giandotti (1959) lo valuta pari al 20%, Canali e Allodi (1963) 22%, Nelson (1970) 12% ed infine Idroser (1994) propone un valore di 15%. Dal Cin (1983) ipotizza un trasporto sul fondo medio annuo di 2,21 Mt per il periodo 1956-64 e di 1,36 Mt per il 1965-73; questi valori evidenziano una riduzione del trasporto per l'ultimo periodo.

Lo studio condotto da Idroser (1994) conferma il decremento dell'apporto solido a mare e propone i seguenti valori medi riferiti alla stazione di Pontelagoscuro: periodo 1918-1943 12,8 Mt/anno, 1956-1965 13,9 Mt/anno, 1966-1975 9,1 Mt/anno; 1976-1985 9,3 Mt/anno; 1986-1991 4,7 Mt/anno. E' possibile, inoltre, ipotizzare che vi siano dei cicli periodici di portata solida della durata di 9-13 anni, corrispondenti a cicli di precipitazione meteorologica con attestazione dei massimi di portata torbida in concomitanza ad ogni massimo di deflusso idrico.

Sulla base delle indagini condotte da Dal Cin e Simeoni (1984) risulta che tra i rami secondari quello di Tolle può trasportare i sedimenti più grossolani. Infine, Idroser (1994) propone la seguente suddivisione del materiale di fondo di dimensioni utili per l'alimentazione delle spiagge: Po di Goro 5 %, Po di Gnocca 13 %, Po di Maistra 1 %, Po di Tolle 13 %, Po di Pila 68 %.

### Il litorale del Delta

Dall'indagine storica si può ipotizzare che il protendimento del delta, dall'epoca etrusca (VI secolo a.C.) fino al 1600, sia stato complessivamente valutabile attorno ai 450 m/secolo. Per il delta moderno valori massimi dell'ordine dei 125 m/anno e minimi di circa 60-80 m/a si registrano negli avanzamenti del sistema Goro-Donzella per il periodo 1700-1870, piena "Piccola Età del Ghiaccio", successivamente nel periodo 1886-1935, anche nel caso di Tolle e Pila, si attestano su valori medi di 30-40 m/a. Tracce di questa fase di crescita del Delta sono evidenti anche nei fondali marini antistanti, dove il moderno prodelta è chiaramente individuabile, sulla base di una superficie di downlap a bassissimo angolo sempre riscontrabile sui profili sismici ad alta risoluzione, al di sopra dei depositi di prodelta più antichi e connessi alle precedenti fasi di formazione del sistema deltizio. Situazione questa particolarmente evidente proprio nell'area di Goro (Fig. 5) dove i depositi sabbiosi del moderno fronte deltizio raggiungono una profondità di circa 5-6 m ed oltre la quale si sviluppa un'ampia area caratterizzata da peliti di prodelta. Questi sedimenti presentano spessori massimi, in prossimità della costa, di 4-5 m e tendono ad annullarsi, ad una profondità di circa 20 m, sui depositi dei precedenti sistemi (Del Grande et al., 1997; Roveri et al. 1997). Più in generale, tutta l'area di prodelta (Gabbianelli et al., 1996; Trincardi et al. 1994) presenta una maggior progradazione del settore centro-meridionale del sistema deltizio, determinata dagli interventi di regolazione antropici a difesa della laguna veneta, rispetto a quello settentrionale.

Sulla base dei documenti cartografici disponibili è poi rilevabile come almeno dai primi dell'800 e fino alla fine del 1945 si assista ad un generalizzato avanzamento delle spiagge del delta. Tale fenomeno risulta particolarmente accentuato alle foci del Po di Pila e nelle penisole del Po di Tolle, Po di Gnocca e del Po di Goro (Visentini, 1940).

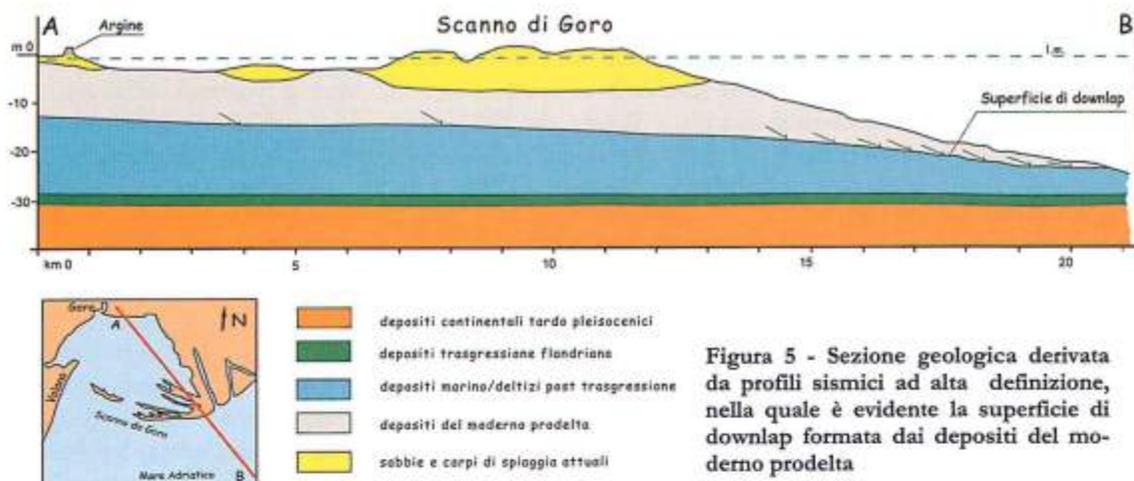


Figura 5 - Sezione geologica derivata da profili sismici ad alta definizione, nella quale è evidente la superficie di downlap formata dai depositi del moderno prodelta

Tra il 1945 e la seconda metà degli anni '60 si verifica invece un generale arretramento della linea di riva, che raggiungerà il suo massimo tra il 1950 ed il 1960, con la sommersione di ampie zone costiere e lo spostamento verso riva di banchi sabbiosi. Entrano così in crisi, ad esempio, alcune spiagge a sud di Porto Levante e la costa orientale del Po di Tolle. Il confronto tra la linea di costa del 1944 (Albani, 1948) e quella del 1973 mette in risalto netti fenomeni di arretramento sia nell'arco meridionale del delta, sia in quello settentrionale (Fig. 6).

Il quadro evolutivo della linea di riva, dalla fine degli anni '60 ai primi anni '90, rimane sempre ancora negativo. Attualmente il sistema degli scanni e dei litorali presenta aree in grave crisi erosiva,

come lungo le spiagge comprese tra le foci dell'Adige e del Po di Levante. Arretramenti preoccupanti sono inoltre in atto anche nella parte meridionale del Delta, in corrispondenza della Sacca di Goro. Si può ipotizzare che oggi le spiagge dell'apparato deltizio del Po traggono alimento in maggior misura dai materiali provenienti dall'erosione di altri litorali e solo in parte da quelli trasportati dai rami fluviali.

Fino agli anni '50, dunque, la relativa abbondanza degli apporti solidi ha fatto sì che la linea di riva avanzasse celermente, accentuando il protendimento in mare dell'area deltizia. Nei decenni successivi s'instaura una brusca inversione di tendenza con perdita di estese aree litorali e sommersione di terreni agricoli, fattori che hanno favorito l'estensione delle aree di sacca (Bondesan e Simeoni, 1983).

Tra le cause dell'arretramento della linea di riva del Delta e dei litorali contigui una delle principali è certamente la diminuzione degli apporti solidi del Po, dovuti alla costruzione di dighe o sbarramenti lungo il corso del Po e dei suoi affluenti, che trattengono i sedimenti entro gli invasi artificiali, ed alle sistemazioni ed abbandono dei bacini montani. La riduzione dei materiali, che giungono al mare e sono utili alla costruzione delle spiagge, è stata notevolmente accentuata dal prelievo d'inerti asportati dall'alveo del fiume (Bondesan e Dal Cin, 1975; Simeoni e Bondesan, 1997). Secondo alcune stime (Dal Cin, 1983) nel periodo 1958-

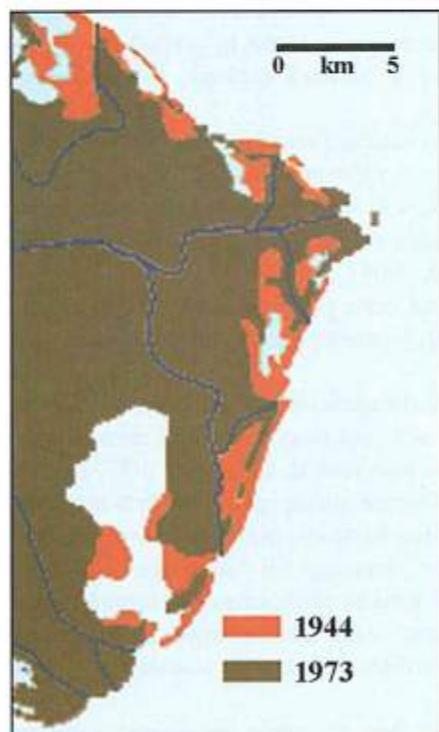


Figura 6 - Evoluzione dell'area litorale del delta padano dal 1944 al 1973 (da Bondesan e Dal Cin, 1973, mod.)

1981 sarebbero stati effettivamente cavati dagli alvei del bacino del Po circa 700 Mm<sup>3</sup> di materiale, costituito in assoluta prevalenza da sabbie e ghiaie (Dal Cin e Simeoni, 1984). Nel solo tratto terminale del fiume nel periodo 1951-1981 sarebbero stati asportati 90-95 Mm<sup>3</sup> di materiale sabbioso.

Un altro fattore che ha condizionato lo sviluppo del Delta soprattutto nell'ultimo secolo è stato l'incremento degli abbassamenti del suolo dovuti alla subsidenza indotta dalle attività antropiche. Il territorio della bassa pianura padana, proprio per la sua stessa natura, è sempre stato caratterizzato da abbassamenti. I suoi valori di subsidenza naturale (1-2 mm/anno) non sono però paragonabili a quelli registrati nell'area deltizia (3-5 mm/a; Bondesan et al. 1995; Cenas, 1997) soprattutto nell'ultimo sessantennio. Essi sono certamente riconducibili (Bondesan e Simeoni, 1983) all'estrazione d'acque metanifere dai giacimenti quaternari, praticata in questi territori fra il 1938 ed il 1961. Caputo et al. (1970) e Borgia et al. (1982) segnalano per il periodo 1951-57 abbassamenti fino a 250 mm/anno nel cuore del Delta, e di 180 mm/a tra il 1958 ed il 1962. Negli anni successivi gli abbassamenti si attenuano, registrando velocità medie di 33 mm/a nel periodo 1962-67 (Caputo et al., 1970) e di 37,5 mm/a nel 1967-74 (Bondesan, 1988). Questi ultimi dati evidenziano il beneficio derivante dalla cessazione delle estrazioni, iniziate verso la fine degli anni '70; oggi questo fenomeno, pur rimanendo intenso, sembra lentamente attenuarsi.

Nei confronti delle spiagge a debole pendenza, come quelle del Delta, la subsidenza, ovviamente, induce non solo arretramenti della linea di riva (diversi metri a fronte d'abbassamenti di pochi centimetri) ma anche un aumento della pendenza dei fondali; in definitiva una riduzione del corpo sabbioso costiero. Ad esempio in alcuni tratti costieri della pianura padana, con tassi di abbassamento valutati tra 1.5 e 3 mm/anno, si è valutato che negli anni '70 vi sia stata una perdita di 0.6 Mm<sup>3</sup>/a di materiale sabbioso.

### Problematiche del basso delta padano

Dai dati sinora esposti emerge chiaramente che, almeno per l'ultimo cinquantennio, l'assetto morfologico del Delta è rappresentativo di un regime *wave-dominated* e non più, come in precedenza generalmente ipotizzato (Smith, 1966; Nelson, 1970; Galloway, 1975; Reineck e Singh, 1980) di *river-dominated* (Fig. 7).

Gli interventi di bonifica, eseguiti nell'ultimo secolo (che hanno ridotto l'area lagunare a circa il 20% dell'originaria estensione nella Bassa Padana), hanno permesso lo sfruttamento agricolo del territorio sia nella provincia di Ferrara sia in quella di Rovigo (Fig. 8). Ciò ha accentuato gli abbassamenti di alcune aree del Delta specialmente nella porzione sud-orientale del delta, in corrispondenza della penisola del Po di Goro, di Donzella e di Tolle (Bondesan et al., 1990).

Agglomerati urbani, grandi rilevati, argini ed altri manufatti di un certo peso, possono aver prodotto abbassamenti del suolo localizzati (Bondesan e Simeoni, 1983), ad esempio in corrispondenza della centrale elettrica di Porto Tolle.

In taluni casi, però, l'evidente tendenza fluviale alle rotte e alle divagazioni nel tratto terminale, che ha dominato l'intera evoluzione deltizia nelle epoche passate, si è resa responsabile di alluvioni anche in tempi recenti (rotta di Occhiobello e Paviole nel 1951 e alluvione di Goro nel 1957) denunciando l'eccessivo irrigidimento territoriale derivante dall'interferenza antropica nell'ultimo secolo.

Anche gli abbassamenti del livello della falda freatica registrati nel territorio possono essere collegati alle operazioni di bonifica oltre che agli emungimenti e drenaggi di eccessiva entità ed all'impermeabilizzazione del terreno su vaste aree. Le suddette attività provocano abbassamenti del suolo a causa del costipamento dei sedimenti non più interessati dalla falda freatica, in pratica incompressibile, ed all'ossidazione dei componenti organici dei sedimenti stessi: la conseguente riduzione di volume è ovvia.

Il territorio litoraneo del Delta del Po sta subendo una gravissima minaccia per l'alterazione del chimismo delle acque dolci superficiali e sotterranee.

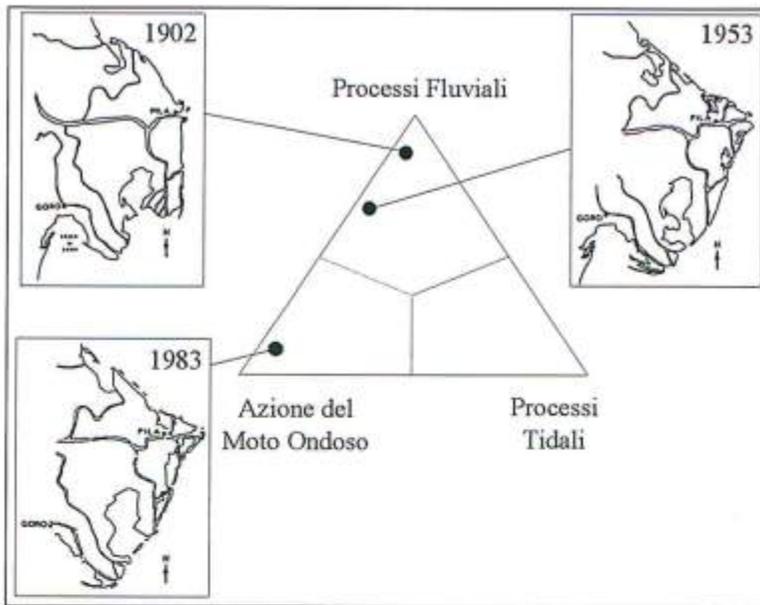


Figura 7 - Morfoevoluzione del Delta del Po.

Dati recenti evidenziano come la risalita del cuneo salino in poche decine di anni si è quintuplicata soprattutto per prelievo eccessivo d'acqua dai fiumi, per magre estive sempre più accentuate e per l'approfondimento degli alvei fluviali. La variazione del livello piezometrico e la conseguente riduzione di portata delle falde idriche, l'incremento della salinità delle acque stanno cambiando le caratteristiche dell'habitat di alcune zone del Delta (Porto Tolle, Comacchio), incrementando ad esempio la deflazione dei terreni.

L'approfondimento degli alvei ha incrementato il rischio per sifonamento e rotture di alcuni tratti arginali, poggianti già su terreni instabili, come in occasione dell'alluvione del '66.

Nell'area più strettamente costiera, oltre ai fenomeni erosivi in atto, grande preoccupazione è legata all'officiosità delle foci fluviali, spesso ostruite da barre sabbiose che limitano le portate recapitabili in mare e rendono difficoltosa la navigazione. La tendenza generale, resa più evidente negli ultimi decenni, al restringimento delle bocche lagunari del Delta ed all'innalzamento dei fondali determina un rallentamento della circolazione idrica interna. Ciò determina una sedimentazione di materiali sempre più fangosi sui fondali lagunari che via via subiscono uno spopolamento di forme di vita bentonica ed un incremento di eventi di anossia delle acque.

Lo stato attuale del territorio deltizio è controllato dai fenomeni descritti in precedenza, spesso interagenti fra loro. Un esempio di tale interazione è rappresentato dalla situazione altimetrica evidenziata in Figura 9 (Bondesan, 1988; Bondesan et al.

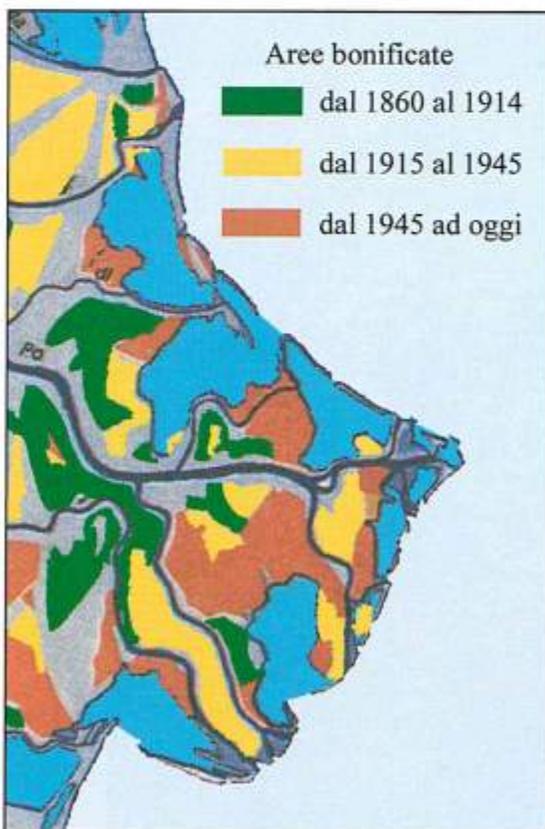


Figura 8 - Superfici bonificate dal 1860 ad oggi nel territorio deltizio (da Pungetti, 1991, mod.).

1990). Come conseguenza della combinazione di abbassamenti naturali ed azione antropica (subsidenza artificiale, irrigidimento degli alvei fluviali), la maggior parte del territorio si trova al di sotto del livello marino ed è inoltre dominato per parecchi metri (6-8 m) dalle piene dei rami terminali del Po e degli altri corsi d'acqua (Adige, Po di Levante, Po di Brondolo, Canale di Valle).

Ciò ha letteralmente sconvolto tutte le strutture della bonifica, tanto che per lo smaltimento delle acque all'esterno sono utilizzati 35 impianti idrovori fra principali e secondari, con una portata complessiva di circa 180 m<sup>3</sup>/s che superano prevalenze geodetiche di 6-9 m. Il sistema pubblico di bonifica idraulica si completa con una rete di canali consorziali di circa 600 km di lunghezza.

D'altro canto, anche l'esagerato allungamento dei rami deltizi, conseguenza dell'irrigidimento dei reticoli idrografici, in concomitanza con altri fattori ha contribuito a far assumere al delta moderno una caratteristica forma a "bacile" con i bordi elevati (verso mare) e una vasta depressione al centro, che ora è a rischio di ingressione marina data la crisi erosiva della fascia litorale (Bondesan, 1989).

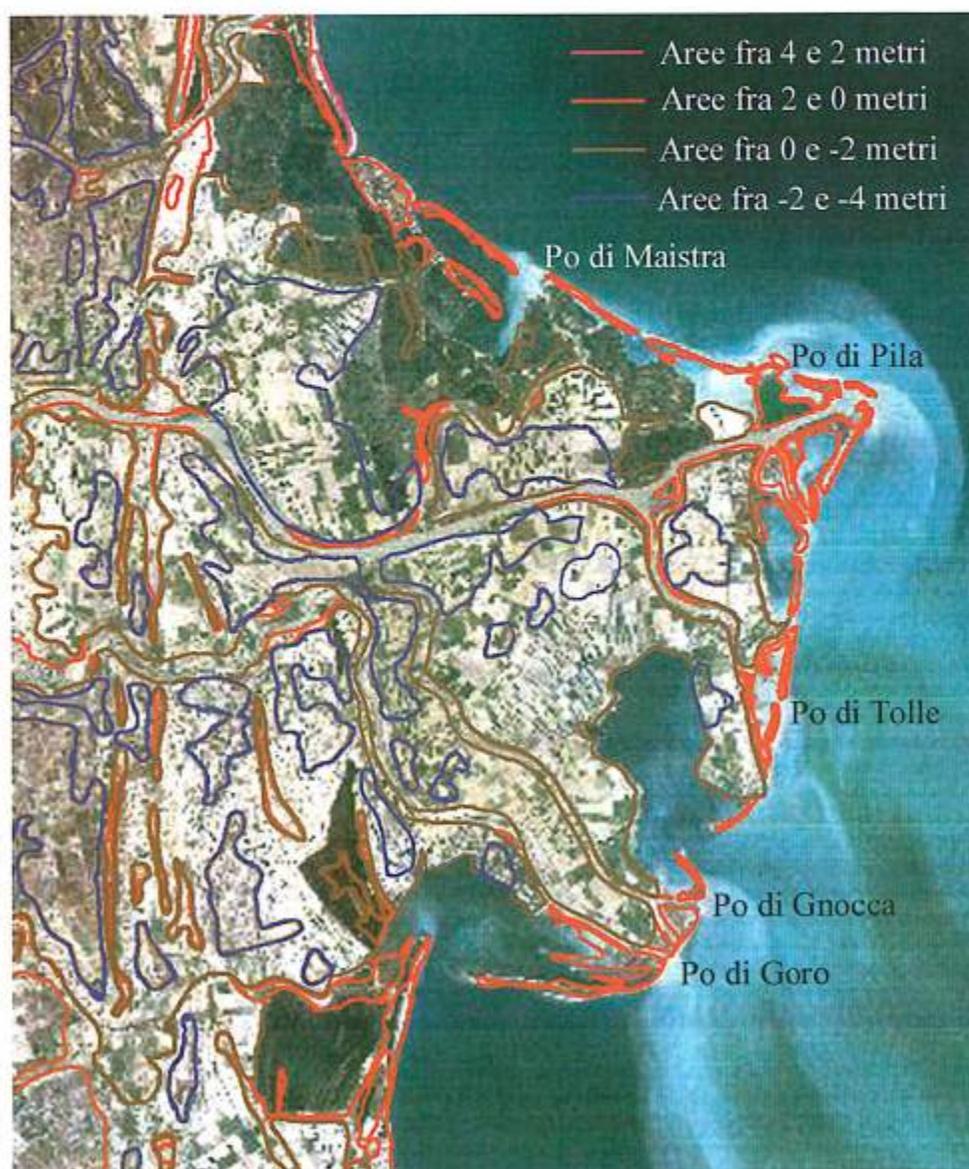


Figura 9 - Situazione altimetrica attuale del territorio deltizio.

L'attuale stato del territorio non è quindi da considerare di "sicurezza" (Bondesan, 1988), benché vi siano indizi per ritenere che almeno alcune delle cause di subsidenza abbiano parzialmente attenuato i loro effetti negativi. Sono, infatti, in fase d'attenuazione gli abbassamenti conseguenti all'estrazione di acque metanifere e quelli collegati agli interventi di bonifica meno recenti. Non è possibile, tuttavia, indicare analoghi trend per altri fattori: in particolare per gli effetti dovuti all'esagerata crescita in lunghezza dei rami fluviali e per l'escavazione di inerti in alveo.

### Scenari futuri

L'andamento delle temperature degli ultimi anni sembra evidenziare un progressivo riscaldamento dell'atmosfera terrestre, con conseguenti diminuzioni delle precipitazioni nelle fasce subequatoriali e subtropicali. Resta da vedere in quale direzione si evolverà il clima alle latitudini più elevate, in particolare nella Pianura Padana e nell'alto Adriatico, ma certamente significative variazioni si registreranno anche in queste aree. Ancora difficile è poi verificare quantitativamente le modifiche del livello marino collegate al termoeustatismo, ma sicuramente l'instaurarsi di un periodo caldo contribuisce ad accentuare il fenomeno trasgressivo. Donovan e Jones (1979) suggeriscono che la variazione di 1 °C nella temperatura media del mare comporta la variazione di circa 1 m del l.m.m.. Le previsioni sugli innalzamenti della temperatura attesi per i prossimi 40-50 anni stimano, sulla base dei metodi di circolazione generale (GCM), un riscaldamento medio globale compreso tra 1.2 e 2°C che possono diventare 3.5-5.2 (Raper et al., 1996). L'innalzamento della temperatura determinerà un innalzamento del livello marino variabile tra 25 ed 80 cm (proiezione media di maggior confidenza), che dovrebbe continuare anche dopo la stabilizzazione dell'effetto serra a causa dei ritardi nelle risposte dei sistemi atmosferico ed oceanico (IPCC 1995; Titus et al., 1995). Fra i possibili futuri "scenari" è anche ipotizzabile una maggiore variabilità ed asprezza del clima, con maggior frequenza di eventi meteorologici finora considerati eccezionali (Bondesan et al. 1990).

Per quanto concerne l'Italia Mosetti e Purga (1991) stimano un innalzamento del l.m.m. compreso tra 1.08 mm/anno e 1.64 mm/anno secondo il metodo impiegato, Mazzarella e Palumbo (1989) stimavano per il periodo 1890-1985  $14.5 \pm 0.6$  cm. Adamoli (1979), con riferimento alle misure mareografiche dell'Alto Adriatico, suggerisce che il l.m.m. si sarebbe innalzato, negli ultimi 100 anni, di circa 20 cm. Questo valore, considerando una pendenza media della spiaggia di 4°-2°, corrisponderebbe ad un arretramento di circa 3-6 m in 100 anni, cioè di 3-6 cm/anno. È però possibile ipotizzare arretramenti maggiori applicando il modello evolutivo proposto da Bruun e Schwartz (1985). In ogni caso la variazione del livello marino ha certamente contribuito solo in minima parte all'arretramento del litorale (Bondesan e Dal Cin, 1975; Simeoni e Bondesan, 1997).

L'incremento del livello medio del mare, l'abbassamento del territorio del Delta, lo smantellamento delle difese naturali della costa (dune, scanni, ecc.) e l'ipotizzabile variazione del clima meteorologico metteranno a rischio porzioni sempre maggiori di territorio. Ciò assume particolare risalto alla luce dei recenti modelli previsionali che mettono in luce la possibilità dell'intensificarsi degli eventi d'inondazione che amplificheranno i fenomeni di erosione della spiaggia e di intrusione di acque salate nelle falde e lungo le foci fluviali, alterando così i delicati equilibri chimico-fisici delle acque del sottosuolo.

Innalzamento del l.m.m. potrebbe esporre nel prossimo secolo il delta ad alluvioni marine catastrofiche in conseguenza di mareggiate ed alte maree eccezionali. Nel loro insieme simili valori d'innalzamento del livello marino portano poi ad aumentare i possibili rischi di *sea surges* e soprattutto di *storm surges*, tanto più che le caratteristiche barico-topografiche dell'Adriatico portano già ad effetti significativi in tal senso. Recenti modellizzazioni ipotizzano eventi possibili con un aumento complessivo del livello marino (per marea, *storm surge*, *wave-set-up*) variabili tra 85-150, 100-195 e 125-245 cm secondo tempi di ritorno, rispettivamente, di 1, 10 e 100 anni (Cenas, 1997). Gli stessi studi concludono per altro che "un'ampia frazione delle attuali zone altimetricamente depresse, possono essere potenzialmente inondate nei prossimi 100 anni anche con eventi meteorologici caratterizzati da periodi di ritorno relativamente brevi (un anno)". A proposito l'evento "eccezionale"

del novembre 1966 può essere significativo in tal senso, avendo fatto registrare la concomitante azione della più intensa mareggiata del secolo, forte piovosità ed una configurazione barica accompagnata da fenomeni d'acqua alta con conseguente sommersione di vastissime zone lungo tutto il litorale nord adriatico (Idroser, 1994).

La gestione di un territorio simile dovrebbe dunque essere improntata, in futuro, su principi di estrema cautela (Bondesan, 1988). E' auspicabile, a tale scopo, che il territorio passi dall'attuale stato di rigidità antropica ad un assetto il più possibile elastico e rispettoso dei meccanismi naturali e che gli sforzi dell'uomo siano indirizzati quantomeno ad un'attenuazione degli effetti negativi prodotti nel passato da approcci gestionali molto spesso ampiamente in disequilibrio con questo tipico ambiente ad elevata dinamicità naturale.

### Ringraziamenti

Gli autori ringraziano M. Bondesan e R. Dal Cin per i suggerimenti forniti per la stesura dell'articolo.

Lo studio è stato condotto con finanziamenti dell'Università degli Studi di Ferrara (ex 60%, responsabile U. Simeoni) e dell'Università di Bologna (ex 60%, responsabile G. Gabbianelli).

### Bibliografia

- Adamoli L. (1979) - *Le cause dell'erosione del litorale abruzzese dal Tronto al Pescara e criteri d'intervento per la sua difesa*. *Notizie dell'Economia Teramana*, 11-12.
- Albani D. (1948) - *Le Foci del Po Secondo le Ultime Riconoscizioni Aeree*. *Riv. Geogr. Ital.*, LV, 4.
- Bondesan M. (1988) - *Aspetti e problemi geomorfologici del territorio deltizio padano: 2a Escursione - Delta del Po*. In: Bondesan M., Elmi C., Nesci O., Dal Cin R. & Veggiani A. (a cura di), *Guida alle escursioni*. Gruppo Nazionale di Geografia Fisica e Geomorfologia, riunione annuale: Riccione - Delta del Po, 21-24 giugno 1988, 31-58.
- Bondesan M. (1989) - *Geomorphological Hazards in the Po delta and adjacent areas*. *Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, II, 25-33.
- Bondesan M. e Dal Cin R. (1975) - *Rapporti fra erosione lungo i litorali emiliano-romagnoli e del delta del Po e attività estrattiva negli alvei fluviali*. In: *Cave e assetto del territorio, Italia Nostra - Regione Emilia Romagna*. pp. 127-137.
- Bondesan M. e Simeoni U. (1983) - *Dinamica e analisi morfologica statistica dei litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta*. *Memorie di Scienze Geologiche*, Padova, XXXVI: 1-48.
- Bondesan M., Favero V. and Vinals M.J. (1995) - *New evidence on the evolution of the Po-Delta coastal plain during the Holocene*. *Quatern. Intern.*, 29/30: 105-110
- Bondesan M., Minarelli A. e Russo P. (1990) - *Analisi dei movimenti verticali del suolo avvenuti nel periodo 1970-1978 lungo l'asta del Po ad est di Polesella e nel delta*. In: *PO AcquAgricolturaAmbiente*, vol 2°: *L'alveo e il delta*; ed. Il Mulino, 385-407.
- Bondesan M., Costigliani G.B., Elmi C., Gabbianelli G., Marocco R., Pirazzoli P.A. e Tomasin A. (1995) - *Coastal areas at risk from storm surges and sea-level rise in northeastern Italy*. *Journ. Coast. Res.*, 11, 4, 1354-1379.
- Borgia G., Brighenti G. e Vitali D. (1982) - *La Coltivazione dei Pozzi Metaniferi del Bacino Polesano e Ferrarese. Esame Critico della Vicenda*. In: *Inarcos, Georise e Territorio*, Bologna, v. 425: 13-23.
- Bradley R. S. and Jones P. (1992) - *The Little Ice Age*. *The Holocene*, 3: 367-376
- Bruun P. and Schwartz M.L. (1985) - *Analytical predictions of beach profile change in response to a sea level rise*. *Z. Geomorph.*, 57: 33-50.
- Canali L. (1957) - *Indagine sulla ripartizione della portata del Po tra i vari rami del Delta e sulla loro attività di deflusso*. *Giornale del Genio Civile*, 97, 12 p.
- Canali L. e Allodi G. (1963) - *Contributo di studio sul trasporto in sospensione dei corsi d'acqua padani e sulla degradazione del suolo nel bacino del Po*. *Giornale del Genio Civile*, 5: 252-272.

- Caputo N., Pieri L. e Ugendoli N. (1970) - *Geometric investigation of the subsidence in the Po delta*. Boll. Geof. Teor. ed Appl., 13-47: 187-207.
- Carbognin L., Gatto P. e Marabini F. (1984) - *Correlation between shoreline variation and subsidence in the Po River Delta, Italy*. IAHS Publication n°51.
- CENAS (1997) - *Study on the coastline evolution of the eastern Po Plain due to sea-level change caused by climate variation and to natural and anthropic subsidence*. Rapporto Definitivo Contract EV5V-CT94-0498 (DG 12 DTEE)- U.E. Environment Programme, Padova. pp. 345.
- Ciabatti M. (1967) - *Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano*. Giornale di Geologia, XXXIV, fascicolo II: 1-27.
- Ciabatti M. e Veggiani A. (1970) - *La linea di costa nel Protovillanoviano tra Cesenatico e Venezia e successiva evoluzione*. Soc. Studi Ravennati: 14-23.
- Dal Cin R. (1983) - *I litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta: caratteri tessiturali e dispersione dei sedimenti, cause dell'arretramento e previsioni sull'evoluzione futura*. Bollettino Società Geologica Italiana, 102: 9-56.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1984) - *Variazioni volumetriche del delta padano nell'ultimo secolo, distribuzione dei sedimenti nei rami deltizi e caratteri granulometrici dei materiali cavati nel basso Po*. In: Atti del 2° Convegno di Idraulica Padana, Tecnografica, Parma, I. pp. 255-279.
- Del Grande C., Gabbianelli G. e Simeoni U. (1997) - *Evoluzione della moderna Sacca di Goro (Delta del Po)*. Riassunti 1° Forum Italiano delle Scienze della Terra, Bellaria. pp. 234- 235.
- Denton G.H. and Karlen W. (1973) - *Holocene Climatic Variations: their pattern and possible cause*. Quaternary Res., 3: 155- 205
- Elmi C., Gabbianelli G. e Marabini S. (1995) - *Holocene subsidences Vs coastal progradation south of the Po Delta (Ravenna, Italy)*. XIV INQUA Abs. Berlino, Terra Nostra. pp. 73.
- ENEL (1980) - *Rilievi idrografici nella parte terminale del Delta del Po. Decennio 1970-1979*. Rapporto interno.
- Lenzi G. (1993) - *Ricostruzione del modello geologico del sottosuolo delle valli di Comacchio*. ENEA, Studio integrato delle Valli di Comacchio. Rapporto tecnico, Bologna.
- Fabbri P. (1985) - *Coastline variations in the Po Delta since 2500 B.P. Z.* Geomorph. N.F., 57: 155- 167.
- Fabbri P. (1994) - *Le trasformazioni della costa tra il Po e l'Appennino*. CUEB Ed., Bologna. pp.120.
- Gabbianelli G. e Elmi C. (1997) - *Submerged evidences of the Roman delta of the Po river near the Reno River mouth (North Adriatic Sea)*. IV Int. Congress of Geomorphology Abs., Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 3/1. pp. 158.
- Idroser (1994) - *Aggiornamento ed integrazione del Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola. Relazione generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp. 276.
- Idroser (1996) - *Progetto di Piano per la Difesa dal Mare e la Riqualificazione Ambientale del Litorale della Regione Emilia-Romagna; Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp. 365.
- IPCC (1995) - *Changes in sea level*, Contribution of Working Group I to the Assesment report, University Press, Cambridge. pp. 363-405.
- Maestri D. (1981) - *Goro e il Delta del Po. Ist. Fondam. Architettura, Univ. di Roma. Tip. Domograf, Roma. pp. 444.*
- Mazzarella A. e Palumbo A. (1989) - *Recent changes of mean sea level in the mediterranean area*. Boll. Oceanologia Teorica ed Applicata, 7: 285-293.
- Mosetti F. e Purga N. (1991) - *Mean sea level evolution in the mediterranean sea*. Boll. Oceanologia Teorica ed Applicata, 9: 305-323.
- Nelson B.W. (1970) - *Hydrography, sediment dispersal and recent historical development of the Po river delta, Italy*. In: Deltaic sedimentation. Modern and recent. Soc. Econ. Paleont. Mineral., Spec. Publ., 15: 152-184.
- Pungetti G. (1991) - *Sistemi deltizi: un confronto tra il delta del Reno e il delta del Po*. In: Pungetti G., Acqua ambiente paesaggio - Pianificazione olandese ed italiana a raffronto. Pitagora Ed., Bologna. Pp. 155-164.

- Rossetti M. e Raffa U. (1973) - *Della evoluzione idrografica e idrologica della regione del delta del Po*. Studi e Ricerche sul delta del Po, Ann. Univ. Ferrara, Sez. I, Suppl. I.
- Roveri M., Correggiari A., Asioli A. e Trincardi F. (1997) - *Evoluzione dei sistemi deltizi costieri tardo-olocenici in Adriatico settentrionale*. Riassunti 1° Forum Italiano delle Scienze della Terra, Bellaria. pp. 41-42.
- Simeoni U. e Bondesan M. (1997) - *The role and responsibility of man in the evolution of the Adriatic alluvial coasts of Italy*. In: F. Briand and A. Maldonado (Editors), Transformations and evolution of the Mediterranean coastline. Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la mer Méditerranée (CIESM), 18, Science Series n° 3. pp. 111-132.
- Smith A.E. (1966) - *Modern deltas: comparison maps*. In: Shirley M.L. (ed.), Deltas their geologic framework, Houston Geol. Soc. pp. 223.
- Titus J.G., Narayanan V.K. (1995) - *The probability of sea level rise*. EPA, Technical report, 184 pp., Washington D.C. .
- Tomasino M. e Dazzi R. (1975) - *Il modello matematico del delta del Po*. L'Energia Elettrica, 52.
- Tonini M. (1975) - *Rilievi idrografici nella parte terminale del delta del Po*. L'Energia Elettrica, 52.
- Trincardi F., Correggiari A., Roveri M. (1994) - *Late Quaternary transgressive erosion and deposition in a modern epicontinental shelf: the Adriatic Semienclosed Basin*. Geo-Marine Letters, 14: 41-51.
- Veggi L. e Roncuzzi A. (1970) - *Contributi e nuove ricerche sull'antica idrografia padana*. Atti Casa Matha, Quad. IV, Ravenna. pp. 1- 56.
- Veggiani A. (1968) - *La linea di spiaggia tra Ravenna e Pesaro all'inizio dell'Era volgare e considerazioni sul ciclo sedimentario olocenico*. Atti Convegno "Antichità di Classe", Ravenna. pp. 115- 133.
- Veggiani A. (1984) - *Il deterioramento climatico dei secoli XVI- XVIII ed i suoi effetti sulla bassa Romagna*. Studi romagnoli, XXXV: 12-34.
- Veggiani A. (1994) - *I deterioramenti climatici dell'Età del Ferro e dell'Alto MedioEvo*. Boll. Soc. Torricelliana, 45: 1-80.
- Visentini M. (1940) - *Ricerche idrografiche nel delta del Po*. Uff. Idr. del Po, Parma, Min. Lav. Pubbl., 2. pp. 175.

Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 23/3/2000.

## Evoluzione dell'area di Goro negli ultimi cinque secoli (Delta del Po)

Giovanni Gabbianelli<sup>1</sup>, Carlo Del Grande<sup>1</sup>, Umberto Simeoni<sup>2</sup>,  
Andrea Zamariolo<sup>2</sup> e Giovanni Calderoni<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scienze Ambientali, Università di Bologna, via degli Ariani, 1-48100 Ravenna

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara,  
C.so Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara

### Riassunto

La moderna Sacca di Goro è il prodotto di un'evoluzione deltizia strettamente controllata dall'uomo e sviluppatasi, in parte, durante un periodo di particolare recrudescenza climatica ("Piccola Età del Ghiaccio"; 1550- 1850 circa). All'inizio del XVII sec. il ramo principale del Po, quello delle Fornaci, fu modificato ("Taglio di Viro") per proteggere dall'interrimento i porti e la laguna veneta. Il nuovo corso, o Po di Viro, diretto verso sud, riempì in pochi anni una prima "Sacca di Goro" che si sviluppava molto più a nord dell'attuale. Nel contempo anche il più meridionale ramo d'Ariano o Goro fu obbligato ad assumere un andamento verso sud. La veloce progradazioni di entrambe le foci in un periodo d'elevato apporto solido a mare portarono alla formazione, all'incirca verso la fine del '700, del golfo di Goro o Sacca dell'Abate. Le variazioni poi intervenute nei regimi sedimentari a seguito delle mutate condizioni climatiche, contribuirono a far assumere alla Sacca una conformazione sempre più lagunare. Verso la fine dell'800 si formano le prime frecce litorali o "scanni" che, sviluppandosi in più sistemi nel corso del secolo successivo, porteranno al progressivo confinamento verso mare dell'originaria insenatura. Le drastiche cadute degli apporti solidi per cause antropiche, che caratterizzano la seconda metà del '900, segnano l'inizio di una nuova fase regressiva, estesa, per altro, a tutto il sistema deltizio del Po.

### Introduzione

I circa 26 km<sup>2</sup> della Sacca di Goro costituiscono l'estremità più meridionale del moderno delta del Po (Fig. 1), proteso a mare per circa 25 km. La sua morfologia è il prodotto di un'evoluzione di circa quattro secoli, con pesanti condizionamenti antropici (Ciabatti, 1968; Nelson, 1970; Bondesan e Simeoni, 1983; Dal Cin, 1983; Bondesan, 1985, 1990; Sestini, 1992; Fabbri, 1994; Simeoni e Bondesan, 1997; Simeoni et al., 1999). Secoli che in buona parte coincidono con un deterioramento climatico registrabile a livello globale ("Piccola Età del Ghiaccio"; 1500 - 1850 circa). Alle medie latitudini esso ha indotto un significativo e generalizzato aumento di piovosità ed erosione dei suoli che, anche nell'area in esame, ha indotto sovralluvionamenti ed incrementi negli apporti solidi a mare (Denton e Karlen, 1973; Maestri, 1981; Veggiani 1982, 1986; Bradley e Jones, 1992; Cazzola, 1995; Marabini, 1996).

Queste vicende sono ben rappresentate nella moderna Sacca o Laguna di Goro sia sotto il profilo sedimentologico che geomorfologico. Le nuove metodologie informativo/informatiche che consentono una migliore integrazione fra dati fisico-naturali, storico-letterari e cartografici, permettono per altro un maggior dettaglio rispetto alle precedenti ricostruzioni evolutive della Sacca (Visentini, 1940; Ciabatti, 1968; Maestri, 1981; Idroser, 1984; Bondesan, 1985; Del Grande et al., 1997; Simeoni et al., 1998). L'attuale Sacca di Goro rappresenta infatti un ambiente molto articolato non solo

per il diacronico interagire tra componenti marine e terrestri, ma anche per la contemporanea e, talora, intensa azione di condizionamento esercitata dall'uomo. Condizionamenti e controlli i cui effetti sono molto spesso ricostruibili, oltre che su base documentaria, grazie al gran numero di prodotti cartografici, seppur pre-geodetici.

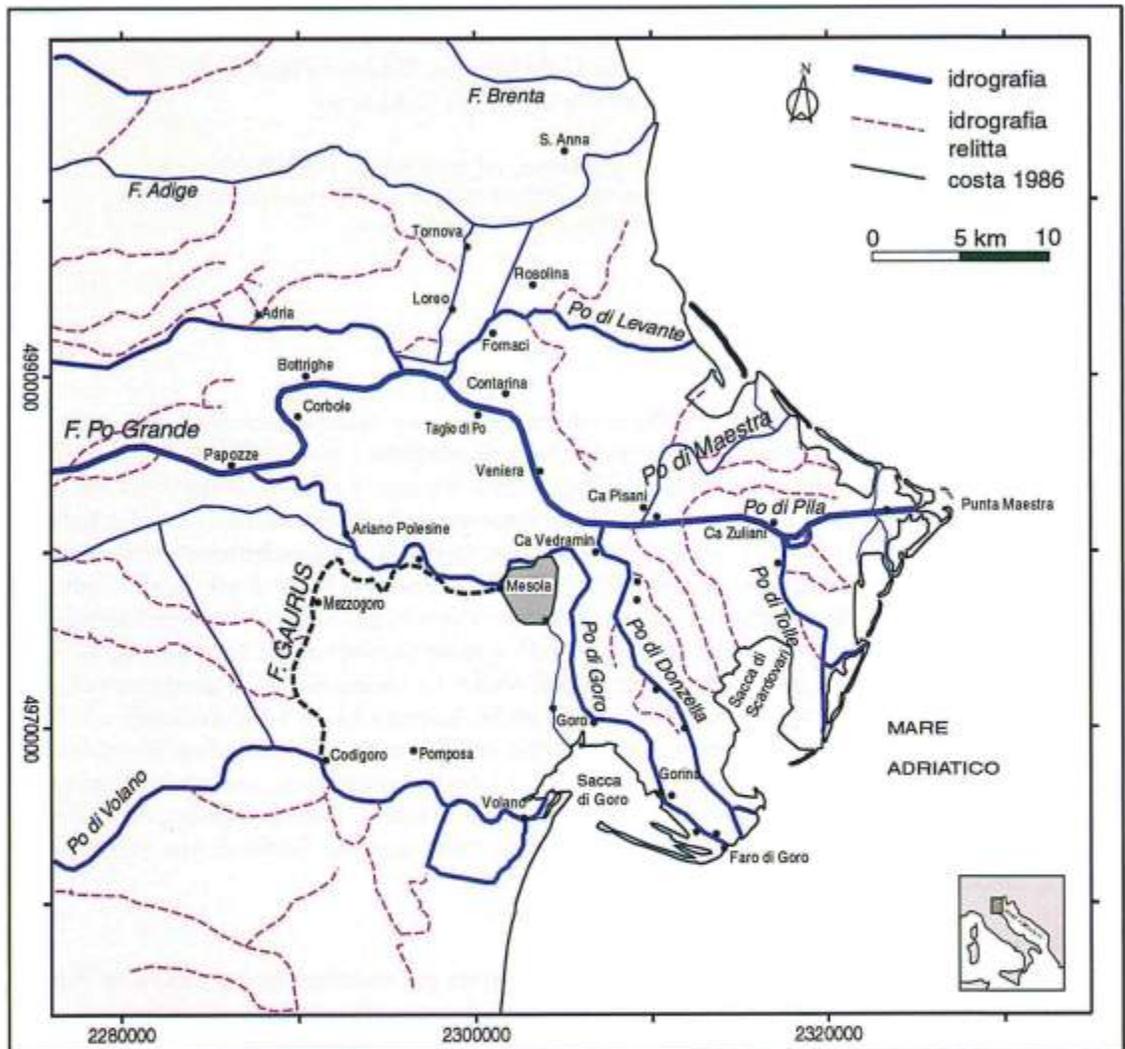


Figura 1 - Il moderno Delta del Po inquadrato nella rete di coordinate chilometriche Gauss-Goaga. In tratteggio lo sviluppo dei principali paleoalvei tra cui quello ben identificabile del "Gaurus" (Da Bondesan, 1985; Bacchi, 1995, mod.).

### Materiali e metodi d'indagine

Tra i numerosi prodotti cartografici, di tipo pre-geodetico, disponibili per l'area (tra cui alcuni particolarmente dettagliati per i loro fini ingegneristici) sono state selezionate circa 20 rappresentazioni. Esse consentono di descrivere le modificazioni territoriali intervenute tra la fine del '500 e la seconda metà del 1800 nell'area del Delta. Le carte storiche sono state scelte sulla base di controlli numerici (ad esempio, precisione raggiungibile nelle georeferenziazioni) e in base al loro grado d'attendibilità rappresentativa così come verificato da diversi autori (Almagnà, 1921; Maestri, 1981; Gambi, 1988; Fabbri, 1994; Ceccarelli, 1998). Ulteriori carte, tutte geodetiche (rilievi IGM, IIM, Consorzi Bonifica e Catastali), coprono il periodo che va dal 1813 al 1986. Per controlli su morfo-

logie regresse e/o ereditate (paleoalvei, cordoni dunari, ecc.) sono state infine utilizzate diverse levate aeree eseguite tra il 1944 ed il 1999.

Ogni prodotto è stato georeferenziato, rototraslato e rigenerato digitalmente su una base cartografica di riferimento (CTR Regione Emilia-Romagna a scala 1:25.000) mediante softwares commerciali (AutocadMap e CadOverlay/ Autodesk®). Un buon grado di precisione planimetrica nei processi rigenerativi è stato raggiunto grazie all'elevato numero di punti di controllo ed aggancio geodetico, ampiamente distribuiti sul territorio polesano. Tra questi le numerose costruzioni storiche, ancor oggi in parte esistenti o ricostruibili con certezza nella loro posizione assoluta (quali, a solo titolo d'esempio, il Castello della Mesola, le varie torri, fortini e postazioni militari, ecc.).

### Caratteristiche dell'attuale Sacca di Goro

Il settore settentrionale della Sacca, tra Goro e Gorino, è oggi delimitato da una serie di scogliere frangiflutto che ne hanno notevolmente modificato l'assetto (Fig. 2). Ad oriente fa da confine l'argine fluviale del Po di Goro sia pur interrotto da diversi varchi, che mettono in comunicazione la laguna con il fiume. Dalla foce di quest'ultimo si dirama verso ovest un sistema di frecce litorali o "scanni", la più esterna delle quali (Scannone o Piallazza di Goro), lunga circa 8km, separa la laguna dal mare. Ad occidente, infine, i limiti della Sacca sono definiti dal litorale di Volano e del Boscone della Mesola.

Le acque provenienti dagli sbocchi delle idrovore, dalle aperture sul Po di Goro e dal Po di Volano costituiscono gli affluenti della Sacca e la loro influenza specifica varia stagionalmente. L'interscambio delle acque con il mare, nel contesto microtidale dell'area (escursioni medie di marea tra - 40 e + 80 cm), avviene principalmente attraverso due bocche, una ubicata a ridosso della foce del Po di Volano e l'altra, d'origine antropica, posta nella parte centro occidentale dello Scannone (Fig. 2).

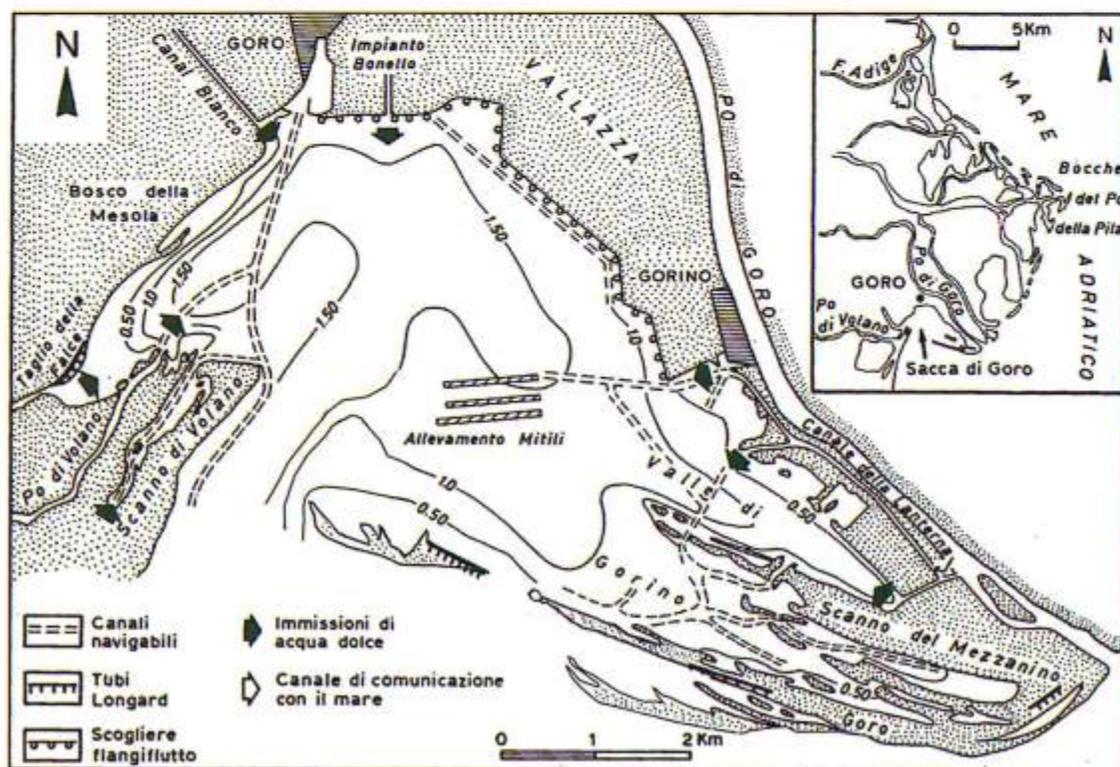


Figura 2 - Lineamenti geomorfologici dell'attuale Sacca di Goro (da Pambianchi et al., 1994, mod.).

Sotto il profilo più strettamente morfologico l'area può essere distinta in tre principali unità: a) territori emersi costituiti per lo più da aree di recente bonifica idraulica e caratterizzate da quote al di sotto del livello del mare; b) la laguna salmastra con fondali poco profondi (1.5- 2 m al massimo); c) il sistema di frecce litorali e barre sabbiose che gli conferiscono i caratteri lagunari. Tutte unità il cui sviluppo è stato differenziato nel tempo e nello spazio in un continuo interagire tra interventi antropici e fenomenologie fisico-naturali (efficienza fluviale, input sedimentari, moto ondoso, correnti, ecc.).

La foce del Po di Goro presenta una morfologia nettamente asimmetrica per l'arretramento erosivo della sponda sinistra e la presenza di una ben sviluppata barra di foce allungata nel lato sovracorrente; elementi che suggeriscono un sistema a forte controllo da parte del moto ondoso (Del Grande et al., 1997; Simeoni et al., 1998). Quest'ultimo, che prevale sull'efficienza dei flussi picnocalici diretti su fondali marini poco profondi e a debole pendenza, genera correnti di deriva litoranea in grado di smistare, prevalentemente verso ovest, i sedimenti sabbiosi, alimentando così il sistema di frecce litorali (Idroser, 1984; Dal Cin, 1994; Lamberti, 1998). L'espansione dei flussi fluviali risulta di tipo ipopicnocalico con galleggiamento delle acque dolci in uscita su quelle marine ("*hypopycnal buoyancy dominated model*"; Wright, 1977, 1985). Modalità questa confermata anche dalla geometria dei pennacchi torbidi generati dagli eventi di piena (Fig. 3) che perdono molto lentamente e gradualmente il loro carico sospeso, espandendosi progressivamente verso il largo.

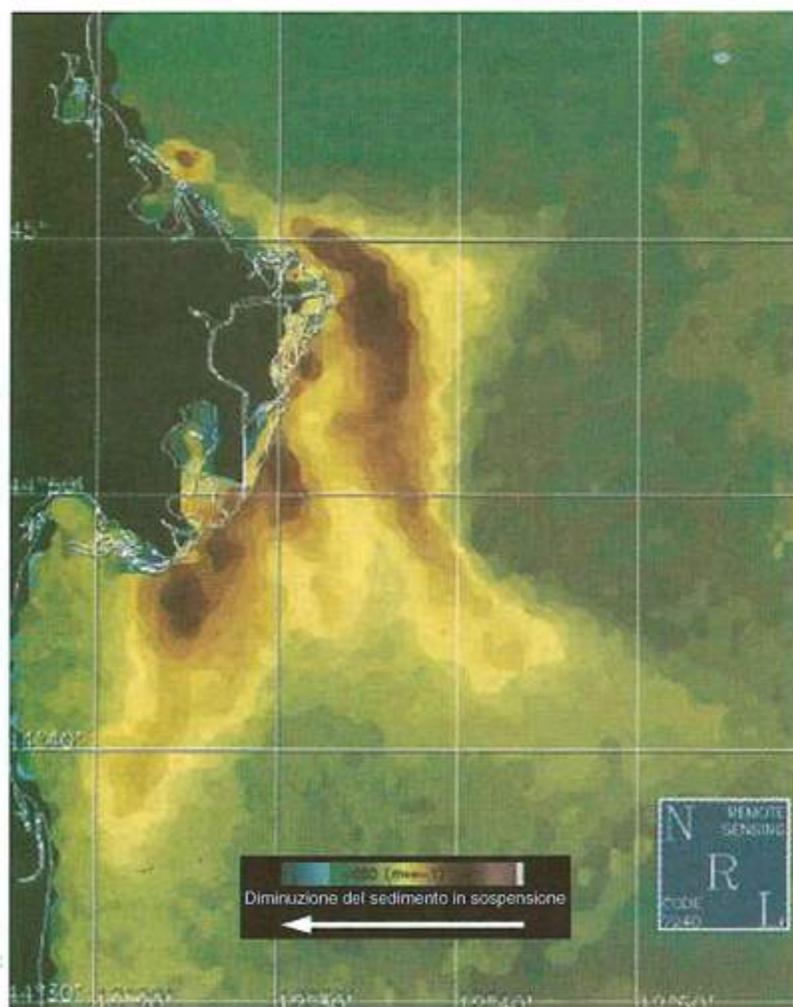


Figura 3 - Tipica distribuzione del pennacchio torbido dei rami del Po durante gli eventi di piena del 10-10-1995 (immagine AVHRR del U.S. Naval Research Laboratory disponibile via Internet).

Le direzioni di trasporto dei materiali sono legate all'assoluta prevalenza dei mari di Scirocco e di Levante rispetto agli altri che, in questa zona, risentono invece dell'effetto "ombra" generato dalla morfologia del delta. Gli apporti sedimentari, che giungono nella Sacca, provengono soprattutto dai contributi solidi del Po di Goro ed in minor misura dal Po di Gnocca e di Tolle e dalla rielaborazione dei depositi delle spiagge più settentrionali.

Il trasporto longitudinale mostra una progressiva riduzione (circa 1/3) procedendo dalla foce di Goro verso la punta dello Scannone (Idroser, 1994).

Altri contributi provengono dalle coste emiliane e, non ultimi, dai biodepositi derivanti dall'intensa attività di maricoltura che negli ultimi decenni interessa la Sacca.

Anche in quest'ultimo secolo, caratterizzato da un marcato deficit sedimentario del Po dopo gli anni '50, la Sacca ha mantenuto una funzione di "trappola sedimentaria", presentando un bilancio dei materiali in attivo (Dal Cin e Simeoni, 1984; Bondesan, 1988; Dal Cin, 1994; Simeoni et al., 1998). A riprova di ciò va ad esempio sottolineato come negli ultimi 10 anni sui fondali antistanti lo Scannone si siano depositi circa 8 milioni di m<sup>3</sup> di sedimento.

Infine non va dimenticato che una forte subsidenza, antropicamente incrementata, interessa l'area. Essa ha fatto registrare nell'ultimo secolo abbassamenti di oltre 1.5 m (Caputo et al., 1970; Bondesan, 1990; Sestini, 1992; Idroser, 1994).

### Evoluzione dell'area

Le prime segnalazioni circa un toponimo "Gaurus" (dal prelatino *gaura* o *gabura*, cioè canale o fossato; Gasca-Queirazza et al., 1990) da cui "Goro", sembrano risalire all'Alto Medioevo, allorché questo nome identificò una diramazione secondaria del più settentrionale tra i due rami principali del Po, quello dell'Olana, denominato poi Volano. Tale diramazione, il cui paleoalveo è ancor oggi ben identificabile (Fig.1), aveva origine nei pressi dell'attuale Codigoro, per dirigersi poi verso nord e sfociare in prossimità di Mesola con due bocche denominate "Portus Gauri" ed "Abbatis" (Bondesan, 1988; Bacchi, 1995).

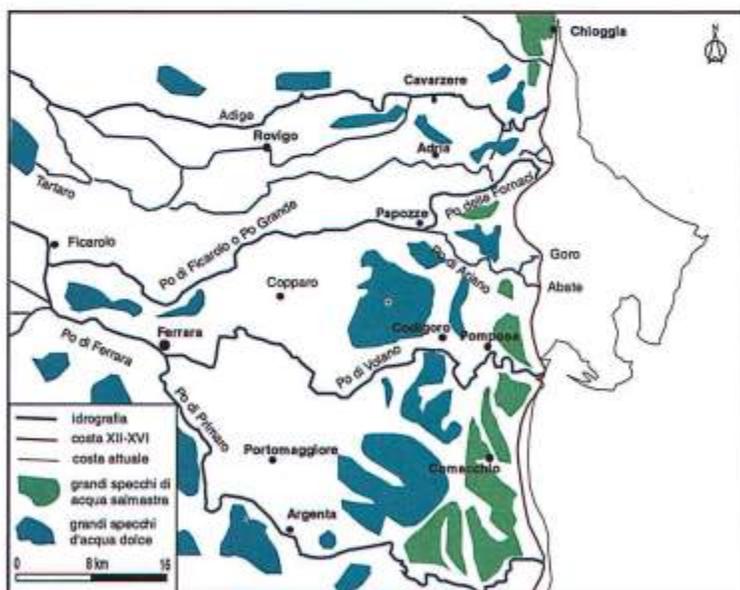


Figura 4 - Schema del reticolo idrografico del Delta del Po intorno al XII - XVI sec. (da Bacchi, 1995, mod.).

Nel 1152, con la Rotta di Ficarolo (Fig.4), l'assetto idrografico deltizio venne però profondamente modificato. A seguito della rotta, il Po di Volano perse infatti gran parte della sua efficienza a favore di un nuovo ramo più settentrionale, il Po Grande, che ancor oggi costituisce il principale distributore del delta (Fig. 1). Quest'ultimo si biforcava, in prossimità di Papozze (Figg. 4, 5), in due rami:

quello delle Fornaci o di Venezia, più settentrionale e diretto verso nord-est, e quello meridionale d'Ariano volto invece verso sud-est.

Verso la fine del '500 la foce di quest'ultimo, ubicata immediatamente ad est del costruendo complesso fortificato della Mesola, si biforcava nei rami di Goro e dell'Abbate (Fig. 5). Il ramo delle Fornaci presentava invece un'articolata morfologia (molteplici diramazioni e bocche, barre e cordoni, ecc.) deltizio-lobata. Tale sistema, localizzato ad est di Rosolina (Bondesan e Simeoni, 1983 1985), si protendeva a mare, rispetto all'attuale linea di costa, per almeno 6 km e copriva un fronte di circa 25 km (Fig. 5).

Nella seconda metà del XVI sec. l'area iniziò a risentire gli effetti d'alcune grandi opere di bonifica e regimentazione artificiale delle acque. Tra il 1556 ed il 1598 fu attuata la "Grande Bonificazione Estense" (Ceccarelli, 1998 cum bibl.) per intercettare e trasferire a mare, attraverso la bocca dell'Abbate, le acque interne di vasti territori furono attivati due nuovi canali artificiali: il Canal Alfonso, poi Bianco, e quello di Bentivoglio (Cazzola, 1995).

La cartografia disponibile evidenzia per altro come verso la fine del '500 la bocca del ramo di Goro, posta immediatamente a nord-est delle fortificazioni della Mesola (Fig. 5), risultasse l'unica veramente attiva. Quella meridionale dell'Abbate (controllata dall'omonima Torre ancor oggi esistente) era infatti ormai completamente regimentata (in parte palificata e regolata da una chiavica a cinque occhi; Fig. 6) ed aveva assunto il ruolo di semplice scolo di bonifica.

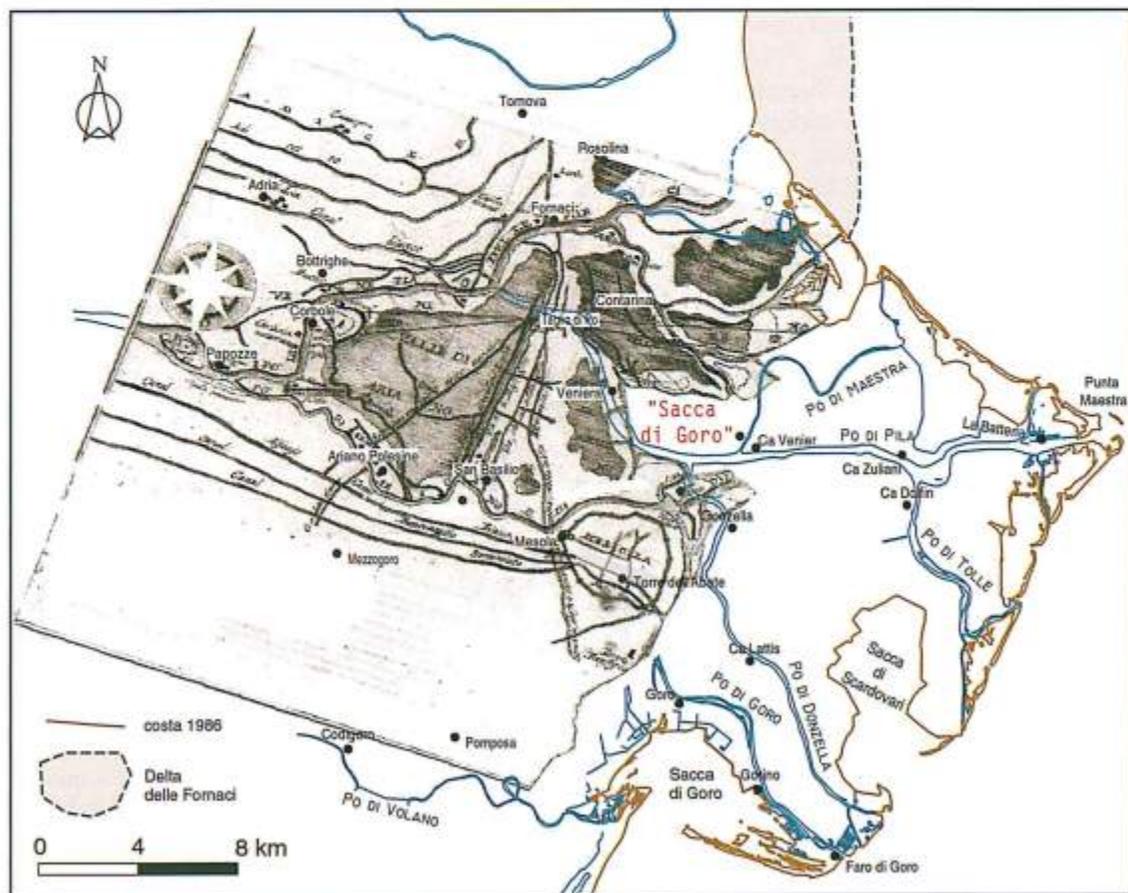


Figura 5 - Esempio di rigenerazione su base geodetica della Carta d'Autore anonimo (1600 d.C. ; Fabbri, 1994). Da notare l'estensione del sistema deltizio del Po delle Fornaci, la foce del Po di Goro (immediatamente a nord-est del sistema fortificato della Mesola) e l'interclusa baia interdistributrice denominata "Sacca di Goro".



A seguito di questi interventi il nuovo ramo del "Po di Viro", "...si protrasse a mare con ritmi di avanzamento stimati in almeno due volte e mezzo quelli antecedenti la rotta di Ficarolo" (Ceccarelli, 1998), accelerando sia i processi di riempimento della Sacca che l'ostruzione della foce del Po di Goro. Quest'ultima fu a sua volta costretta a dirigersi verso sud anche a seguito d'alcuni interventi regimatori secondari (Fig.7).

Il principale effetto del "taglio" fu però quello di originare, così come già rilevato da diversi autori (Ciabatti, 1968; Veggiani, 1982; Bondesan, 1985; Fabbri, 1994; Simeoni e Bondesan, 1997), il moderno sistema deltizio. Sistema che inizia a delinearsi già verso la fine del '600, allorché un nuovo delta, centrato sul ramo del Po di Viro, si protendeva a mare con forma lobata per circa 7 km (Fig. 8).

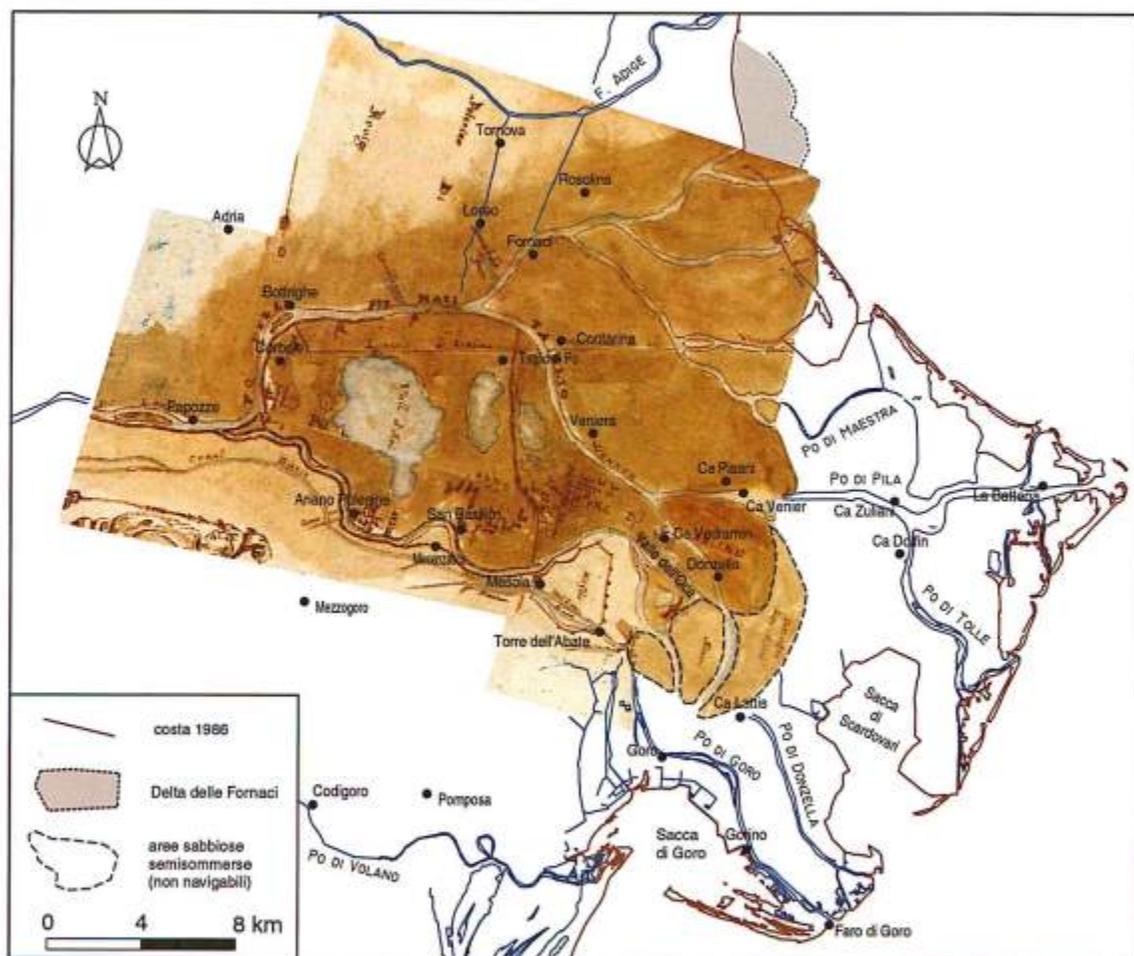


Figura 7 - Elaborazione della Carta d'Autore anonimo, probabilmente redatta intorno al 1658 (Fabbri, 1994), che evidenzia il rapido colmamento della Sacca di Goro a seguito del "Taglio di Viro" ed il nuovo andamento verso sud assunto dai rami del Po di Goro e di Viro.

Il più meridionale dei suoi distributori, quello della Donzella, sopravanzava nettamente la foce del Po di Goro e solo una ristretta area valliva (Valle dell'Oca) s'interponeva fra i due. Per contro tra la costa e la foce della stessa Donzella si apriva una nuova insenatura, prevalentemente allungata verso sud (circa 3 x 1 km), denominata "Porto o Sacca di Goro".

In pochi decenni, per l'azione antropica ed il notevole apporto solido a mare dei rami fluviali, l'area mutò dunque radicalmente la sua morfologia e le naturali tendenze evolutive. In proposito vale per altro sottolineare come i veneziani, sempre tesi a contrastare efficacemente l'interrimento dei loro

porti e della laguna, nominarono “un custode delle bocche del Po” incaricato di vigilarle e dirigerle costantemente verso sud (Visentini, 1940; Ceccarelli, 1998).

Il prevalere di una tendenza del sistema deltizio a svilupparsi verso nord-est si mantenne però fin verso la fine del '700: periodo in cui il ramo di Maestra (Fig. 9) iniziò a perdere d'importanza.

Nel frattempo entrava in crisi l'officiosità della rete scolante della “Grande Bonificazione”, aggravata dal generalizzato peggioramento climatico indotto dalla “Piccola Età del Ghiaccio” e, non ultima, dalla subsidenza. Questa, infatti, modificando la direzione di scolo dei canali e abbassando sotto il livello del mare vaste aree, favoriva l'impaludamento di notevoli estensioni territoriali (Maestri, 1981).

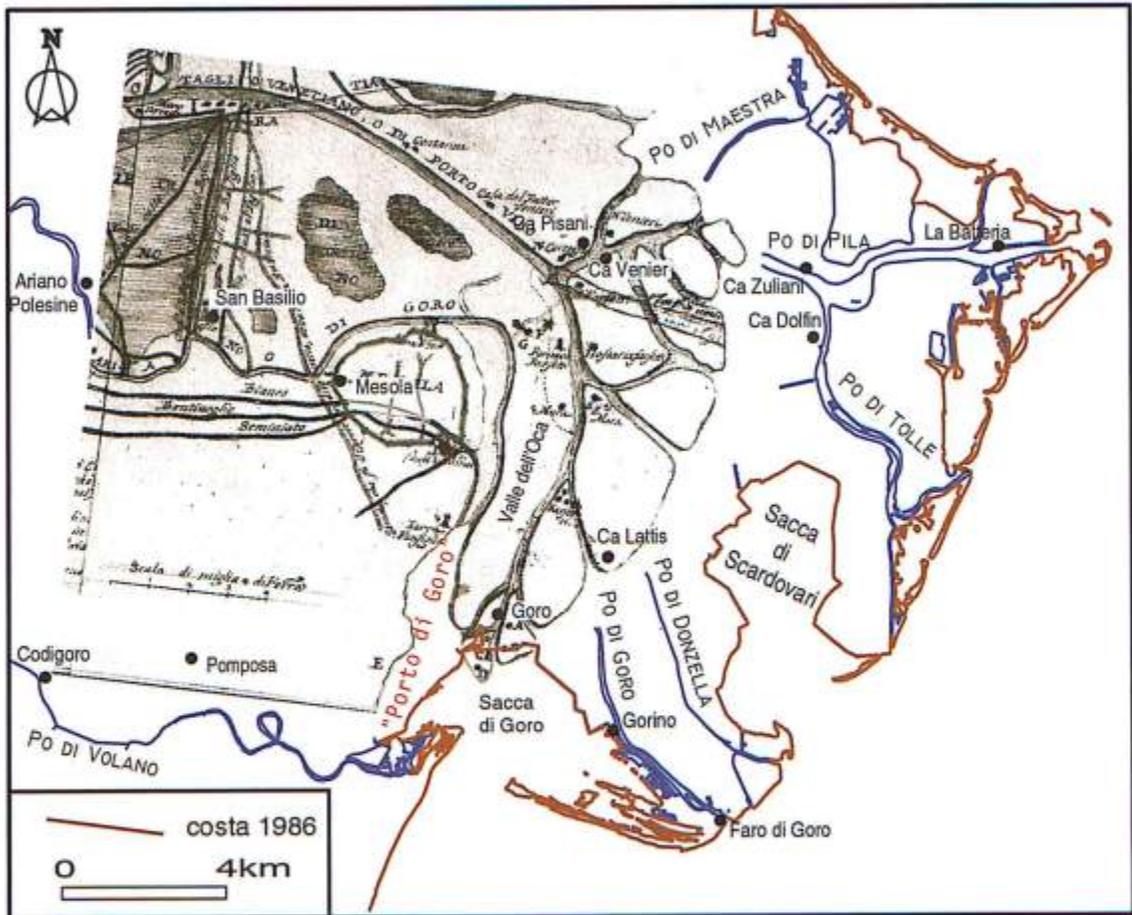


Figura 8 - Rigenerazione della Carta di Autore anonimo, che rappresenta lo sviluppo del delta intorno al 1690 (Fabbri, 1994), che evidenzia le prime fasi di sviluppo del moderno sistema deltizio.

Nel XVIII secolo i rami del Po di Goro e della Donzella sono ormai avanzati in mare di oltre 9 km rispetto alla loro posizione originaria, delineando pressoché completamente il moderno sistema deltizio (Fig. 9). Nella prima metà '700 è ormai del tutto colmata la preesistente “Sacca di Goro” ed i rapporti reciproci tra i rami della Donzella e di Goro si sono ulteriormente modificati (Fig. 9).

La foce di quest'ultimo, che ha ormai raggiunto l'altezza del moderno abitato di Goro, tende a svilupparsi verso est ed è caratterizzata da una biforcazione; il ramo più meridionale o del “Po Morto”, creatasi intorno al 1703, fu abbandonato nel 1738. Negli anni successivi alcuni interventi diressero l'asta terminale del fiume verso sud, conferendo così al corso d'acqua quella brusca variazione d'andamento che la caratterizza a quest'altezza (Fig. 1).

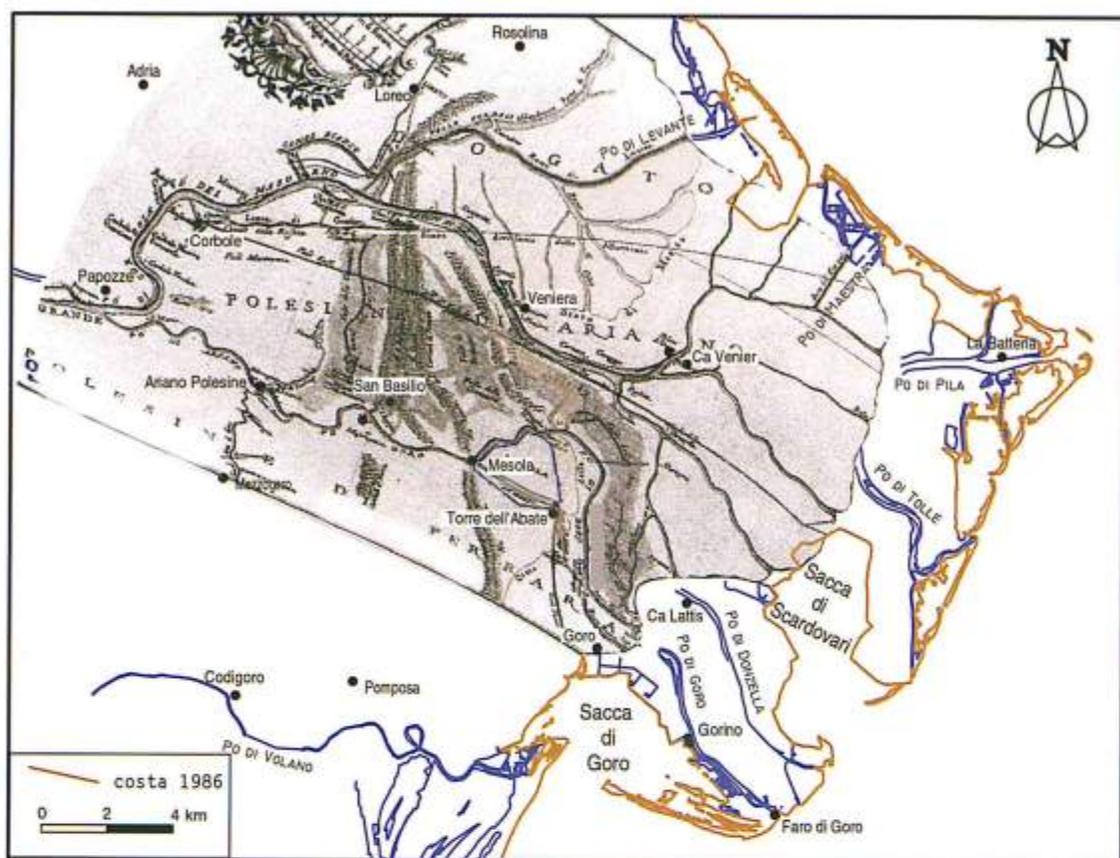


Figura 9 - Rigenerazione di una rappresentazione del Delta del Po nella prima metà del '700 (Carta redatta da Jacomelli nel 1736; Fabbri, 1994). Ormai colmata anche la seconda Sacca di Goro, l'omonima foce ha raggiunto il moderno abitato di Goro dopo aver subito una marcata rotazione da sud verso est. Il contiguo ramo della Donzella presenta già la biforcazione, che si consoliderà nel successivo ramo principale della Gnocca.

Sempre in questi anni nascono per altro, a ridosso d'alcune installazioni militari, i primi insediamenti civili che diedero origine all'abitato di Goro (Maestri, 1981).

Intorno al 1770 vi fu, in prossimità di Ca' Venier (Fig. 9), un'ulteriore regimentazione del Po Grande per raccogliere una maggior quantità di acque nel ramo della Gnocca e per aumentare l'afflusso nel ramo di Tolle a scapito di quello della Maestra (Visentini, 1940).

Tra la seconda metà del '700 e la prima dell'800, le foci di Goro e della Donzella continuano ad avanzare velocemente protendendosi per oltre 6 Km ed in questo periodo inizia a delinearsi l'insenatura o baia che costituirà la moderna Sacca di Goro o dell'Abbate; insenatura che, com'è evidenziato dalle dettagliate carte austriache dell'epoca (Fig. 10), agli inizi dell'800 raggiunge già un'estensione di circa 17 km<sup>2</sup>.

Attorno al 1820 il Po di Goro sfociava all'altezza di Gorino Ferrarese con tre diramazioni principali, di cui quella rivolta a sud-ovest s'interrò quasi immediatamente (1822). Stessa evoluzione subì quella rivolta verso levante, mentre la centrale si protende verso sud d'ulteriori 2 km circa nei successivi 50 anni. Nello stesso tempo la foce del Po di Volano, che rappresenta il limite occidentale della Sacca (Fig. 10), presenta ancora una morfologia imbutiforme, senza evidenti strutture deposizionali sommerse. Alcuni documenti cartografici minori, riferiti alla topografia del Porto di Goro e databili intorno al 1820 (Maestri, 1981), evidenziano come l'abbandono e la formazione di nuovi canali sia avvenuta a seguito delle forti piene del 1819, seguendo dinamiche del tutto assimilabili a meccanismi del tipo "rotta d'argine" (*crevassing*).

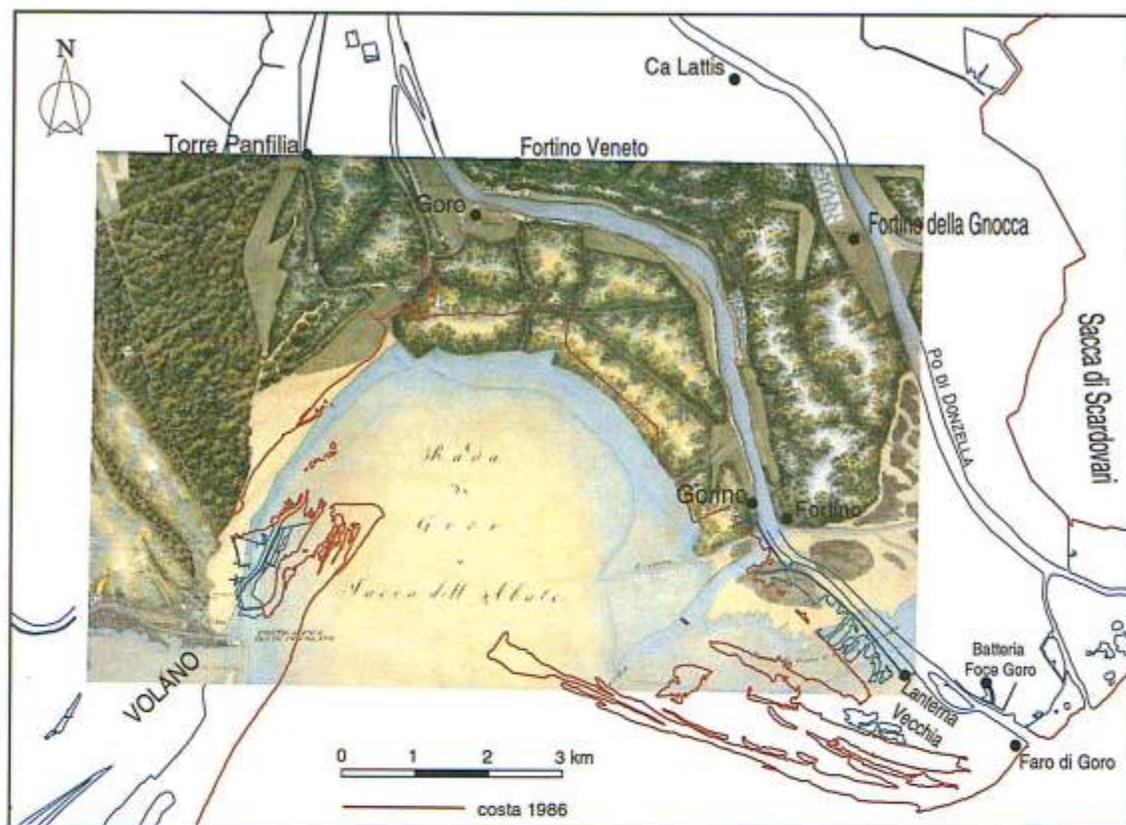


Figura 10 - Particolare di una Carta Austro-Ungarica pubblicata nel 1814, che mostra la moderna Sacca di Goro ormai ben delineata nelle sue principali caratteristiche. Evidente l'assenza di forme sedimentarie (cordoni, barre, ecc.) alla foce del Po di Volano, mentre quella di Goro presenta una distribuzione radiale ed a complessiva geometria sub-triangolare delle stesse.

Le rappresentazioni cartografiche disponibili per gli anni successivi evidenziano come, per il sempre minor apporto solido a mare legato al concludersi della "Piccola Età del Ghiaccio", si assista ad una netta riduzione dei tassi d'avanzamento delle foci in tutto il sistema deltizio ed, in particolare, di quelle del Po di Goro e di Donzella (Fig. 11).

Per queste ultime, per altro, la cartografia di fine ottocento, ormai di buona precisione geodetica, indica non solo che barre centrali, talora arcuate, tendono a sostituire quelle distribuite radialmente alle foci ma, soprattutto, come in corrispondenza del lato sottocorrente di queste ultime inizino a svilupparsi delle frecce litorali (Fig. 12). Nel frattempo, in corrispondenza della foce del Po di Volano, inizia a prodursi quell'allungamento verso nord del bordo meridionale, sovracorrente, che, progressivamente, gli conferirà quella tipica "falciatura" ancor oggi visibile (Fig. 12).

Una simile variazione, a testimonianza del complessivo cambiamento intervenuto nei regimi sedimentari, si registra anche nella vicina foce del fiume Reno (Bondesan, 1990; Fig. 1).

Nella prima metà del '900 i tassi d'avanzamento delle foci diminuiscono sempre più marcatamente, così come schematizzato in Figura 13. Per contro il sempre maggior sviluppo di diversi sistemi di frecce litorali preclude sempre più la Sacca all'azione diretta del mare, favorendo il deposito di materiali fini al suo interno; deposito che ancor oggi compensa sufficientemente la subsidenza dell'area.

Dagli anni '50 nell'area si registrano nette tendenze regressive (arretramenti alla foce dell'ordine dei 6 m/anno) in gran parte imputabili alla significativa diminuzione degli apporti solidi a mare, in buona parte per l'estrazione d'inerti dagli alvei, che raggiunse il suo culmine tra gli anni '60 ed '80 (Dal Cin e Simeoni, 1984; Simeoni e Bondesan, 1997; Simeoni et al., 1999).

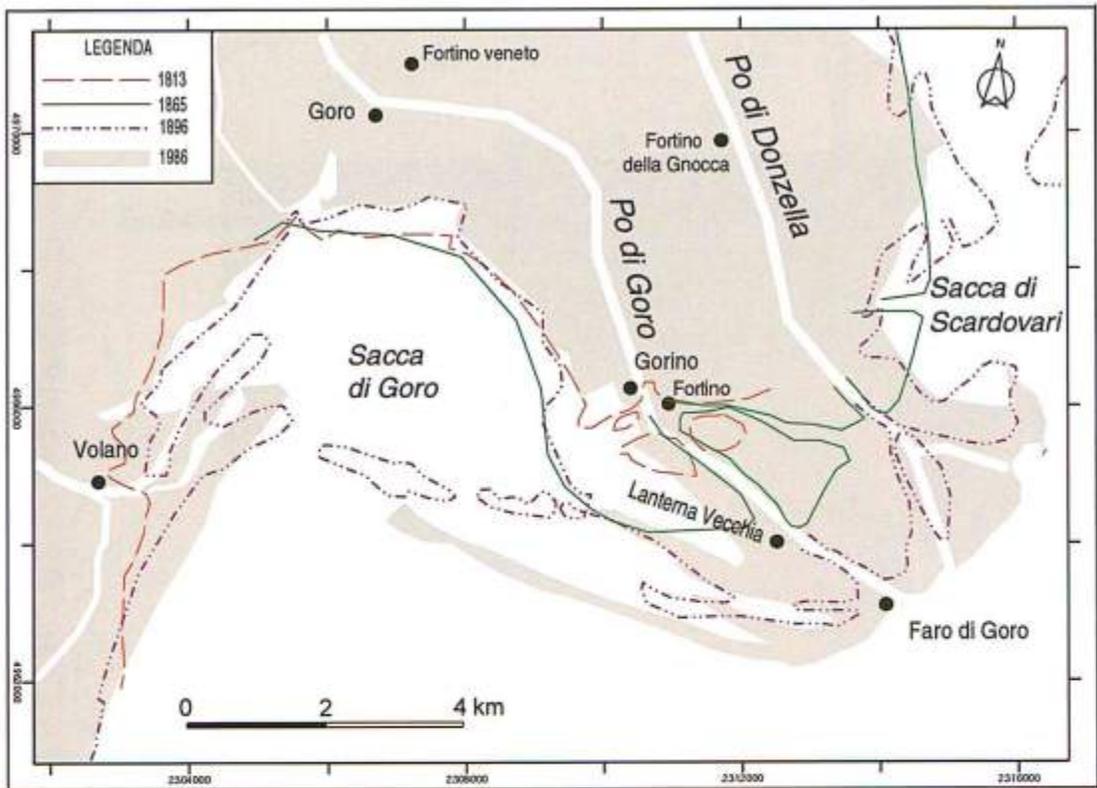


Figura 11 - Ricostruzione schematica delle principali linee di costa succedutesi nell'area di Goro tra il 1813 e il 1896. Ben evidente l'articolato sistema di frecce litorali che già a fine secolo occluderà parzialmente la Sacca.

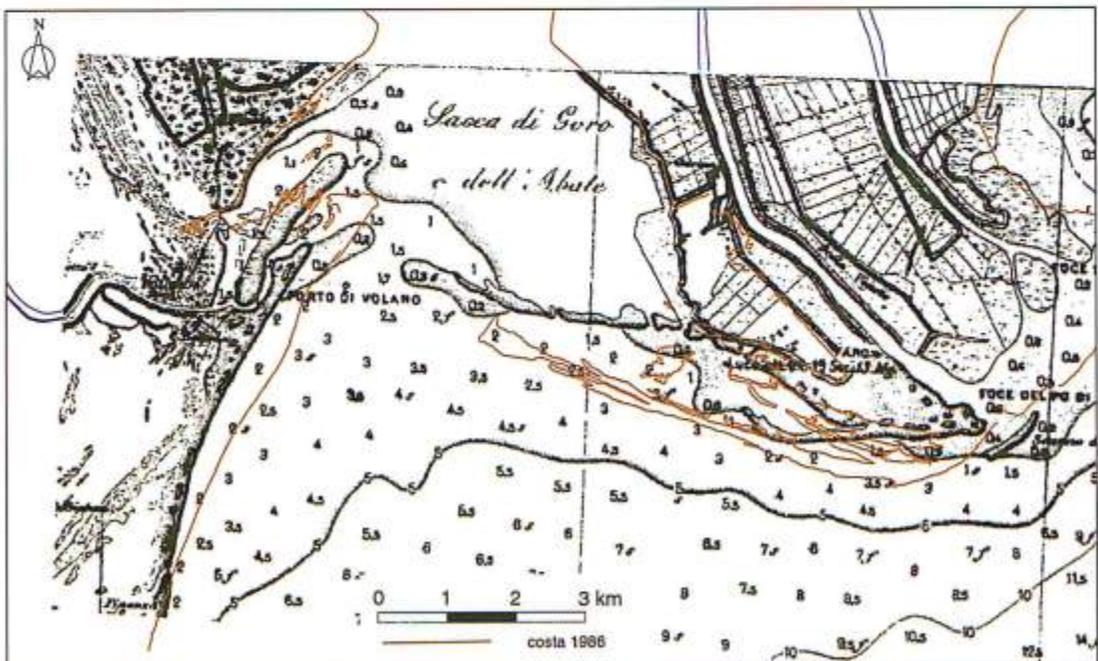


Figura 12 - Carta nautica basata su rilievi di fine '800, che mostra lo sviluppo del sistema di frecce litorali. Evidente la crescita di una barra arcuata di fronte alla foce del Po di Goro, mentre la foce del Po di Volano presenta ormai un marcato sviluppo verso nord del suo lato sopracorrente.

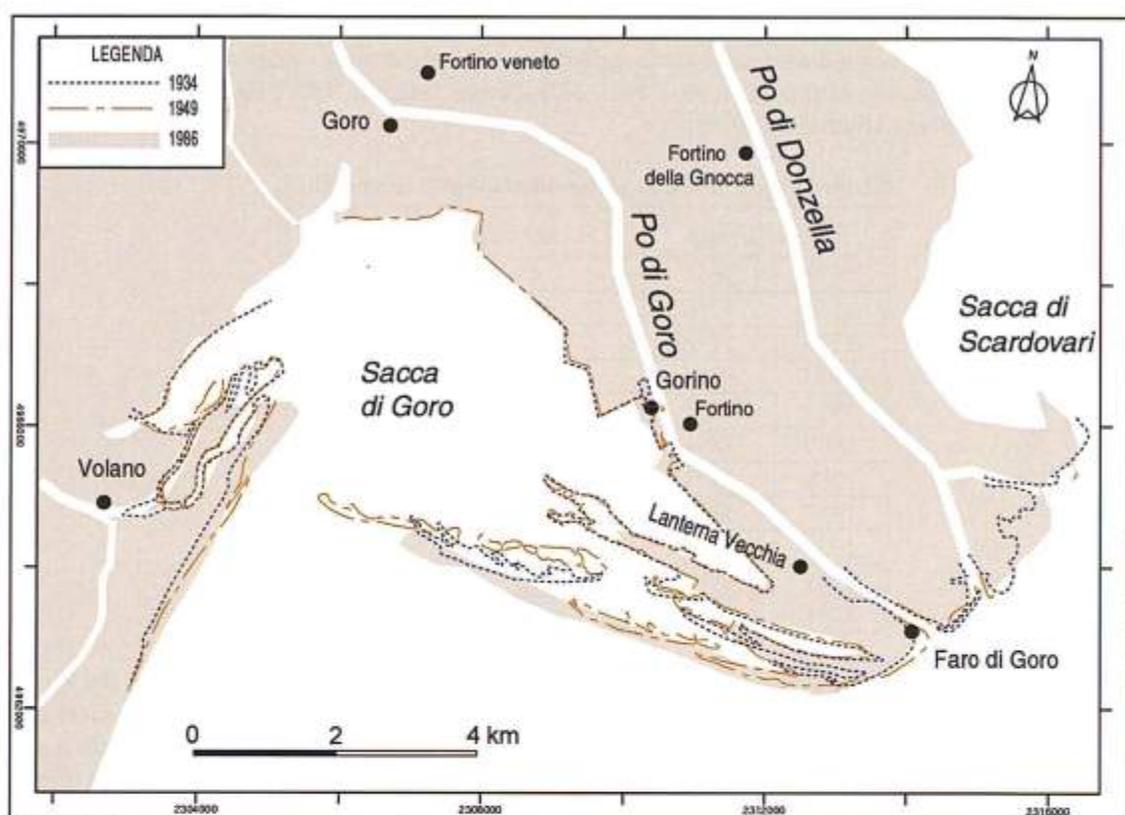


Figura 13 - Ricostruzione schematica delle principali linee di costa succedutesi nell'area nella prima metà' del '900. Evidente l'evolversi del sistema di frecce litorali o "scanni".

### Discussione

L'integrazione e la correlazione d'informazioni della più diversa tipologia ed origine hanno evidenziato come, a macroscale, l'attuale configurazione del moderno sistema deltizio del Po ed, in particolare, dell'area di Goro sia stata sostanzialmente condizionata dalle attività antropiche di regimentazione. Attività che si sono sovrapposte agli effetti delle variazioni naturali connesse alla "Piccola Età del Ghiaccio". Quest'ultime hanno influenzato sensibilmente il regime fluviale e la quantità di input sedimentari distribuiti sui fondali, che nell'Adriatico presentano bassa profondità e debole pendenza.

Infatti, è indubbio che le geometrie deltizie del Po, se correlate con i numerosi modelli presenti in letteratura (Wright, 1977, 1985; Galloway, 1975; U.S Army Corps, 1995; Reading e Collinson, 1996), siano passate negli ultimi cinque secoli da dinamiche tipicamente "costruttive", dominate da un'elevata efficienza fluviale, a situazioni "distruttive" controllate dal moto ondoso e dalle correnti litoranee.

Il passaggio tra le due condizioni si è, all'incirca, determinato con la netta caduta degli apporti solidi a mare conseguenti alla fine della "Piccola Età del Ghiaccio". Il controllo da parte degli agenti meteo-marini si è poi consolidato progressivamente, sino a prevalere dopo la notevole riduzione degli apporti sedimentari a mare registrati nella seconda metà del '900.

Conferme a questo quadro evolutivo vengono sia dalle variazioni registrabili nei tassi d'accrescimento frontale delle foci di Goro e di Donzella (Fig. 14; Tab. 1), sia dalla tipologia dei vari sistemi di foce alternatisi nel tempo. In particolare, i tassi d'accrescimento evidenziano come da valori medi dell'ordine dei 75 m/anno, registratisi all'incirca durante la "Piccola Età del Ghiaccio", si sia passati a circa 10-15 m/anno nel periodo successivo per arrivare infine a fenomeni regressivi,

seppur di modesta entità (circa -3, -5 m/anno), per il periodo 1949- 1986. Per altro una significativa variazione dei tassi di sedimentazione è stata registrata pressoché in tutti i sistemi deltizi mediterranei quali, a solo titolo di esempio, l'Ebro, il Nilo ed il Tevere (Mariño, 1992; Fanos et al., 1995) ed in quello del Danubio (Mikhailova, 1995).

Tabella 1 - Tassi di spostamento calcolati per il ramo di Goro.

Intervalli anni		Spostamento (m/anno)
1592	1658	85
1658	1736	69
1736	1770	102
1770	1813	52
1813	1869	65
1869	1896	14
1896	1931	5
1931	1934	44
1934	1949	13
1949	1964	-5
1964	1986	-3

Più in particolare i maggiori avanzamenti registrabili su base cartografica per i distributori del Po di Goro e di Donzella sembrano ascrivibili a due distinti periodi: il primo relativo alla prima metà del 1600 ed il secondo intorno al 1750. Punte secondarie si sono avute poi nell'intorno del 1900 e del 1930. Tali periodi coincidono con buon'approssimazione ai periodi che, sia a livello globale (Denton e Karlen, 1973; Bradley e Jones, 1992) che locale (Visentini, 1940; Maestri, 1981; Veggiani 1982, 1986; Cazzola, 1995; Ceccarelli, 1998), fanno registrare un marcato peggioramento climatico.

Un generale miglioramento delle condizioni climatiche si registra poi a partire 1860, ma gli stessi Autori riconoscono il verificarsi di condizioni negative simili alle precedenti per gli anni 1880-92 e 1912-25. Un dato ancor più significativo in tal senso è ricavabile dall'analisi degli eventi di piena del Po condotto da Camuffo ed Enzi (1994) che, proprio per questi periodi, individuano un marcato aumento nella frequenza delle inondazioni legate al Po.

In merito alla geometria delle foci va sottolineato come queste, nella cartografia fine '500- inizio '800 (Figg. 8, 10 e 14), siano sempre indicate con barre, canali e cordoni (talora ricollegabili a fenomeni di rotta d'argine nella piana deltizia inferiore o alla sua fronte) distribuiti radialmente intorno alla foce stessa che assume così una complessiva geometria sub-triangolare. Caratteri questi che, nel loro insieme, permettono di ipotizzare dinamiche sedimentarie connesse con un'elevata efficienza fluviale e flussi in uscita di tipo ipopicalico "*friction dominated*". Per contro, almeno a partire dalla fine del 1800, prevalgono e si consolidano sistemi di foce caratterizzati da barre centrali (talora emerse ed arcuate) e frecce litorali; morfologie tipiche cioè di ambienti, quali gli attuali, prevalentemente controllati dal moto ondoso a partire da flussi ipopicalici "*buoyancy dominated*" (Wright, 1977; Coleman, 1988; Orton e Reading, 1993; Leeder, 1999). Ad ulteriore testimonianza delle variate condizioni sedimentarie indotte dalla conclusione della "Piccola Età del Ghiaccio", va infine registrato come con la fine dell'800 anche le foci dei corsi d'acqua limitrofi, ma ormai del tutto svincolati dal sistema deltizio del Po, quali, ad esempio, il Po di Volano ed il Reno (Fig. 1), variano il loro assetto iniziando ad assumere quel marcato allungamento verso nord del loro lato sovracorrente (Fig. 12). E' però indubbio che il Taglio di Viro e le successive regimentazioni artificiali abbiano drasticamente modificato i naturali scenari evolutivi dell'area, prima sostanzialmente protesa verso nord-est e poi sempre forzatamente indotta a progredire verso levante e verso sud.

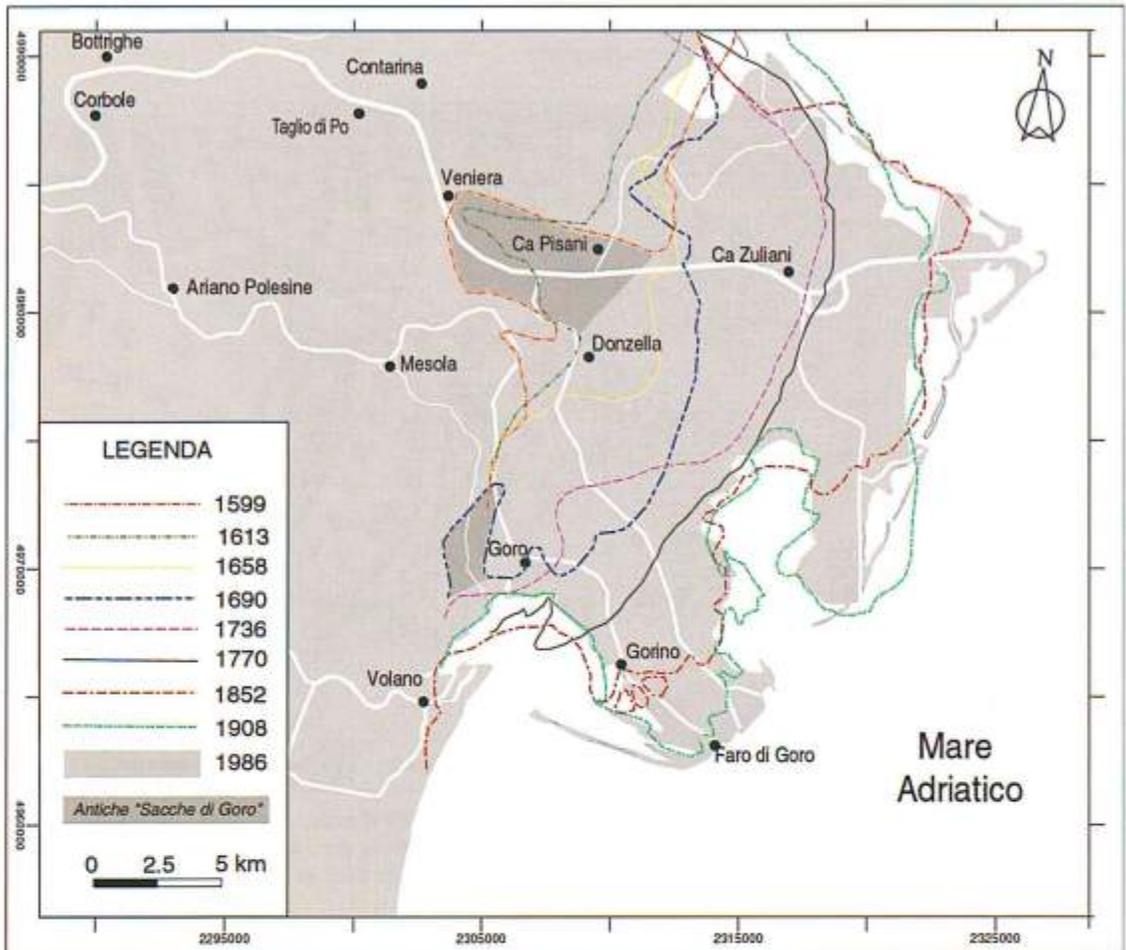


Figura 14 - Schema riassuntivo delle principali linee di costa e delle diverse "Sacche di Goro" succedutesi nell'area Delta del Po dalla seconda metà del '500 ad oggi.

Naturalmente, in un simile scenario, anche la subsidenza ha giocato un ruolo significativo. A livello di foci però gli alti tassi di sedimentazione sono riusciti nel passato a compensarla, contribuendo così a far assumere al sistema la tipica progradazione sigmoide dei depositi di fronte deltizia e di prodelta (Del Grande et al., 1997; Regione Emilia-Romagna, 1999). Nella piana deltizia l'elevata subsidenza ha invece indotto abbassamenti tali da riportare sotto il livello del mare vaste estensioni territoriali il cui impaludamento è stato risolto solo con le grandi bonifiche meccaniche intraprese nell'ultimo secolo (Maestri, 1981).

A cause antropiche vanno poi imputate anche le brusche variazioni che, prima all'altezza della Mesola e poi di Goro, caratterizzano il corso del Po di Goro e, in minor misura, quello della Donzella (Fig. 1). Variazioni che, come in precedenza descritto, sono completamente da ascrivere ad interventi antropici e non certo a cause naturali quali, ad esempio, i processi di meandrazione.

Le ricostruzioni effettuate permettono infine di verificare come la Sacca, pur conservando il toponimo di più antiche baie interdistributrici susseguitesi nell'area a partire dal '500 (Fig. 15), abbia un'origine relativamente recente ed all'incirca ascrivibile alla fine del XVIII secolo.

Il suo passaggio da ambiente marino a lagunare coincide con le prime fasi tardo ottocentesche di formazione delle frecce litorali, poi ampiamente sviluppatasi nel secolo successivo. L'area ha così sempre più ridotto i suoi interscambi con il mare aperto, raggiungendo condizioni d'occlusione

ormai prossime alle tipiche morfologie lagunari che si riscontrano all'interno di quel variegato ambiente rappresentato dalle piane deltizie inferiori.



Figura 15 - La rappresentazione cartografica pre-geodetica di fine '500 illustra, con buona attendibilità rappresentativa, la morfologia d'alcune foci del delta del Po (da una carta redatta per i lavori del Taglio di Viro; Ceccarelli, 1998). Evidente il complessivo assetto sub-triangolare delle singole foci, determinato da una distribuzione radiale di barre, canali e cordoni.

### Ringraziamenti

Tutte le elaborazioni digitali sono state eseguite, con la collaborazione del Sig. Mauro Altizio, presso il Laboratorio CAD/GIS del Corso di Laurea in Scienze Ambientali dell'Università di Bologna, sede di Ravenna. Una parte significativa della cartografia storica deriva da indicazioni fornite dal Dott. Paiola del Servizio Geologico del Comune di Comacchio e dal Prof. F. Ceccarelli del Corso di Laurea in Beni Culturali dell'Università di Bologna, cui va un particolare riconoscimento. Lavoro svolto con fondi ex 60% dell'Università di Bologna (responsabile G. Gabbianelli) e dell'Università di Ferrara (responsabile U. Simeoni) e con fondi COFIN 98 del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (responsabile R. Dal Cin).

### Bibliografia

- Almagià R. (1921) - *Per una raccolta ed una illustrazione dei più importanti documenti cartografici concernenti l'Italia, anteriori al secolo XVIII*. "L'Universo", II, pp. 135-139.
- Bacchi T. (1995) - *Il Delta Medievale*. In "Il Parco del Delta del Po", Sez.V: L'ambiente come Storia. 110-122, Spazio Libri Ed., Ferrara
- Bondesan M. e Simeoni U. (1983) - *Dinamica e analisi morfologica statistica dei litorali del Delta del Po ed alle foci dell'Adige e Brenta*. Mem. Sc. Geol., Padova, XXXVI: 1-48
- Bondesan M. (1985) - *Quadro schematico dell'evoluzione geomorfologica olocenica del territorio costiero compreso tra Adria e Ravenna*. Atti Tav. Rot. "Il Delta del Po", Acc. Sc. Dell'Ist. Di Bologna, pp. 23-36, Bologna.

- Bondesan M. (1988) - *Aspetti e problemi geomorfologici del territorio deltizio padano: 2a Escursione - Delta del Po*. In: Bondesan M., Elmi C., Nesci O., Dal Cin R. & Veggiani A. (a cura di), Guida alle escursioni. Gruppo Nazionale di Geografia Fisica e Geomorfologia, riunione annuale: Riccione - Delta del Po, 21-24 giugno 1988, 31-58.
- Bondesan M. (1990) - *Le zone umide salmastre dell'Emilia-Romagna: aspetti geografici e geomorfologici*. In: Aspetti naturalistici delle zone umide salmastre dell'Emilia-Romagna. Regione Emilia-Romagna, 23-49, Bologna.
- Bondesan M., Favero V. e Vinals M.J. (1995) - *New evidence on the evolution of the Po delta Coastal Planing during the olocene*. Quaternary International, Vol. 29/30: 105-110.
- Bradley R. S. e Jones P. (1992) - *The Little Ice Age*. The Holocene, 3: 367- 376
- Camuffo D. e Enzi S. (1994) - *Cambiamenti climatici negli ultimi 2000 anni*. Il Quaternario, 7: 257- 266
- Caputo N., Pieri L. e Unguendoli N. (1970) - *Geometric investigation of the subsidence in the Po Delta*. Boll. Geof. Teor. Appl., 13: 187- 207.
- Carter R.W.G. (1988) - *Coastal environments*. Academic Press, pp. 617, London
- Cazzola F. (1995) - *La grande impresa: le bonifiche estensi*. In "Il Parco del Delta del Po", Sez.V: L'ambiente come Storia. p 124-137, Spazio Libri Ed., Ferrara.
- Ceccarelli F. (1998) - *La città di Alcina: architettura e politica alle foci del Po nel tardo cinquecento*. Il Mulino Ed., 286 pp., Bologna.
- Ciabatti M. (1968) - *Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano*. Giornale di Geologia, XXXIV: 318- 410.
- Coleman J.M. (1988) - *Dynamic changes and processes in the Mississippi River Delta*. Bull. Geol. Soc. of America, 100: 999- 1015
- Dal Cin R. (1983) - *I litorali del Delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta: caratteri tessiturati e dispersione dei sedimenti, cause dell'arretramento e previsioni sull'evoluzione futura*. Boll. Soc. Geol. It., 102: 9-56.
- Dal Cin R. (1994) - *Lo Scannone di Goro nel Delta del Po: evoluzione morfologica e possibili interventi per conservare l'ambiente della laguna retrostante*. In "Sacca di Goro: Studio integrato sull'ecologia (a cura di Bencivelli S., Castaldi N., Finessi D.) " Sacca di Goro: studio integrato sull'ecologia", pp. 291-303, Ed. Franco Angeli, Milano, Ferrara.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1984) - *Variazioni volumetriche del delta padano nell'ultimo secolo, distribuzione dei sedimenti nei rami deltizi e caratteri granulometrici dei materiali cavati nel basso Po*. In: Atti del 2° Convegno di Idraulica Padana, Tecnografica, Parma, I. pp. 255-279.
- Del Grande C., Gabbianelli G. e Simeoni U. (1997) - *Lineamenti evolutivi della moderna Sacca di Goro (Delta del Po)*. Atti 1° Forum Italiano di Scienze della Terra, pp. 234- 235, Bellaria.
- Denton G.H. e Karlen W. (1973) - *Holocene Climatic Variations: their pattern and possible cause*. Quaternary Res., 3: 155- 205.
- Fabbi P. (1994) - *Le trasformazioni della costa tra il Po e l'Appennino sulla base della documentazione cartografica d'età moderna*. Dip. di discipline Geografiche e Geologico Ambientali. Colana studi sul territorio. pp. 129, CLUEB, Bologna.
- Fanos M.A., Naffa G.M., Gewilli M.Y. e Ali M.M. (1995) - *Coastal processes along Burullus bedland Nile Delta, Egypt*. In (Ozhan E. Ed.) Proceedings of the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, 2: 1033- 1047.
- Galloway W.E. (1975) - *Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems*. In: Deltas, Models for Exploration (Ed. by M.L. Broussard), Houston Geol. Soc., pp. 87-98, Houston.
- Gambi L. (1988) - *Le prime geoiconografie con esplicite informazioni politiche*. In: Persistenze feudali e autonomie comunitative in stati padani fra Cinque e Ottocento. A cura di Giovanni Tocci. pp. 18-32, CLUEB, Bologna.
- Gasca-Queirazza G., Marcato C., Pellegrini G.B., Petracco-Sicardi G. e Rossebastiano A. (1990) - *Dizionario di Toponomastica*. pp. 217, UTET, Torino.
- Idroser (1984) - *Piano progettuale per la difesa della costa Adriatica, Emiliano-Romagnola* Regione Emilia Romagna, vol. II-III-IV, pp. 636.

- Idroser (1994) - *Progetto di Piano per la Difesa dal Mare e la Riqualificazione Ambientale del Litorale della Regione Emilia-Romagna; Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp. 365.
- Lamberti P. (1998) - *Opere di Somma urgenza per la movimentazione naturale delle acque all'interno della Sacca di Goro*. Progetto esecutivo: relazione idraulica. Amm. Provinciale di Ferrara.
- Leeder M. (1999) - *Sedimentology and Sedimentary Basin: from turbulence to tectonics. River Deltas*. Pp. 383-397, Blackwell Science, London.
- Maestri D. (1981) - *Goro e il Delta del Po*. Ist. Fondam. Architettura, Univ. di Roma. Tip. Domograf, Roma, pp. 444.
- Marabini F. (1996) - *Evoluzione dell'ambiente costiero in tempi storici e le variazioni climatiche*. Il Quaternario, 9: 201- 204.
- Mariño M.G. (1992) - *Implications of Climatic Change on the Ebro Delta*. In (Leftic L., Milliman J.D., Sestini G., Eds.) *Climatic Change and the Mediterranean*, pp. 282- 302, UNEP, Great Britain.
- Mikhailova M. (1995) - *Formation of the Danube and Rioni Deltas and their coasts*. In (Ozhan E. Ed.) *Proceedings of the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment*, 2: 898- 911.
- Nelson B.W. (1970) - *Hydrography, sediment dispersal and recent historical development of the Po Delta, Italy*. SEPM Spec. Pub., 15: 152-184.
- Orton G.J. e Reading H.G. (1993) - *Variability of detrital processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size*. *Sedimentology*, 40: 475-512.
- Pambianchi P., Rosso G. e Frascari F. (1994) - *Nutrienti e sostanza organica nei sedimenti della Sacca di Goro*. In "Sacca di Goro: studio integrato sull'ecologia (a cura di Bencivelli S., Castaldi N., Finessi D.) " Sacca di Goro: studio integrato sull'ecologia", pp. 269- 280, Ed. Franco Angeli Milano, Ferrara.
- Reading H. G. e Collinson J.D. (1996) - *Clastic Coasts*. In: *Sedimentary Environments*, Ed. Reading H.G., Blackwell Scienze, pp. 687, Oxford.
- Regione Emilia Romagna (1999) - *Note illustrative Carta Geologica d'Italia scala 1: 50.000 - Ravenna*. A cura di A. Amorosi, pp 144, Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato Ed., Roma.
- Sestini G. (1992) - *Implications of climatic changes for the Po delta and Venice Lagoon*. In: *Climatic Change and the Mediterranean*. Leftic L., Milliman J.D., Sestini G., (Eds.). Pp. 429- 490, UNEP, Great Britain.
- Simeoni U. e Bondesan M. (1997) - *The role and responsibility of man in the evolution of the Adriatic alluvial coasts of Italy*. In: F. Briand and A. Maldonado (Eds.), *Transformations and evolution of the Mediterranean coastline*. Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la mer Méditerranée (CIESM), 18, Science Series n° 3. pp. 111-132.
- Simeoni U., Ciavola P., Fontolan G., Mazzini E. e Tessari U. (1998) - *Centennial evolution of a recurved spit: a case study from the spit of Goro Lagoon Po Delta (Italy)*. Rapp. 35° Com. Int. Mer Medit., in CIESM Congress Proceedings, Dubrovnik (Croazia), 35: 100- 101.
- Simeoni U., Gabbianelli G. e Melandri S. (1999) - *Effetti sulle attività antropiche e dell'innalzamento del livello marino sull'evoluzione del litorale emiliano-romagnolo*. In: Atti del convegno "Conoscenza e salvaguardia delle aree di pianura", 8-16 novembre, pp. 42-44, Ferrara.
- U. S. Army Corps of Engineers, 1995. *Coastal Geology*. Engineer Manual, 185 pp., Washington D.C..
- Veggiani A. (1982) - *La Piccola Età Glaciale e gli impaludamenti tra Conselice ed Alfonsine*. Studi Romagnoli, XXXIII: 1- 20.
- Veggiani A. (1984) - *Il deterioramento climatico dei secoli XVI- XVIII ed i suoi effetti sulla bassa Romagna*. Studi Romagnoli, XXXV: 12- 34.
- Veggiani A. (1986) - *Le fluttuazioni del clima dal XVIII al XX secolo. I cicli di Bruckner*. Estratto da "Torricelliana", 37(1986) Bollettino della società Torricelliana di Scienze e Lettere, pp. 1-56, Faenza.
- Visentini M. (1940) - *Ricerche idrografiche nel delta del Po*. Uff. Idr. Del Po, Parma, Min. Lav. Pubbl., 2, 175 p.

- Wright L.D. (1977) - *Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis*. Bull. Geol. Soc. Am., 88: 857-868.
- Wright L.D. (1985) - *River Deltas*. Coastal Sedimentary Environments, R.A Davis Ed., pp. 1-76, Springer Verlag, New York.

**Manoscritto ricevuto il 3/3/2000, accettato il 7/4/2000.**

## Stratigrafia dei depositi recenti della Sacca di Goro

Giorgio Fontolan<sup>1</sup>, Stefano Covelli<sup>1</sup>, Annelore Bezzi<sup>1</sup>,  
Virginie Tesolin<sup>1</sup> e Umberto Simeoni<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine,  
Università degli Studi di Trieste, v. E. Weiss 2 - 34127 Trieste

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche,  
Università degli Studi di Ferrara, Corso Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara

### Riassunto

La Sacca di Goro è un ambiente lagunare di genesi recente, che deve la sua origine al forte protendimento del delta del Po di Goro, avvenuto prevalentemente durante gli ultimi due secoli. Lo studio stratigrafico di 21 carote raccolte all'interno della sacca ha consentito di ricostruire le trasformazioni dell'area, fortemente influenzate dalla mutua interazione tra carico solido legato al getto di foce del Po di Goro e di Volano e la subsidenza, naturale ed antropica, che ha prodotto abbassamenti di circa 160 cm durante l'ultimo secolo.

La successione dei sedimenti e le tipologie di facies evidenziano il passaggio da un dominio di fronte deltizio ad uno più francamente lagunare, i cui connotati naturali sono in parte obliterati a causa delle modificazioni indotte dal rimaneggiamento antropico (pesca con le rasche, escavazioni, tombamenti, etc.). Viene confermata comunque la caratteristica della sacca a fungere da trappola sedimentaria, in quanto l'approfondimento dei fondali lagunari conseguente alla fortissima subsidenza e all'eustatismo è stato compensato per quasi il 50% dalla sedimentazione di materiali fini. Si stima che, da quando l'area ha assunto una posizione marginale rispetto all'aggetto deltizio del Po di Goro, il tasso di sedimentazione medio non sia stato inferiore a 8 mm/anno.

### Premessa

La Sacca di Goro (Fig. 1), la più meridionale delle aree lagunari del delta del Po, è fortemente influenzata dagli apporti sedimentari del Po di Goro, subordinatamente dai rami compresi tra il Po di Pila e di Goro e dalla deriva litoranea proveniente da sud. Limitata a mare dalla presenza della freccia litorale (scanno di Goro) che ne determina la configurazione tipica di un ambiente lagunare, l'area della sacca ha mantenuto una funzione di "trappola sedimentaria" durante tutto quest'ultimo secolo e, anche nei periodi di maggior deficit di apporti solidi del Po, il bilancio sedimentario è sempre stato in attivo (Simeoni et al., questo volume).

La dinamica evolutiva della sacca, la cui formazione può essere fatta risalire alla fine del XVIII secolo, è stata determinata dall'azione di due fattori principali: la vicinanza a grosse sorgenti terrigene e la subsidenza. La combinazione di questi due fattori ha avuto come risultato un'evoluzione sintetizzabile con una tendenza alla formazione di ambienti via via più protetti, ma resa complicata dalla tendenza, opposta, all'ingressione marina.

Sebbene la sua genesi sia recente, la Sacca di Goro ha registrato rilevanti ed articolate modificazioni che trovano pochi riscontri in letteratura e che necessitano di uno studio stratigrafico di dettaglio, oggetto di questo lavoro.

### La Sacca di Goro e la sua evoluzione storica

L'attuale Sacca di Goro presenta una configurazione a carattere lagunare, con un'estensione di circa 2000 ettari (Idroser, 1994) e una profondità media di poco superiore al metro. L'evoluzione ambientale da baia aperta, ad ambiente paralagunare, a laguna vera e propria è stata determinata dalla progressiva formazione di scanni sabbiosi, protesi in direzione ESE-ONO (Simeoni et al., 1988a; 1988b).

Nella laguna attuale confluiscono le acque provenienti dal mare attraverso la bocca della Sacca di Goro, unica apertura a mare prima del taglio dello scanno operato dall'uomo, e le acque dolci provenienti dagli sbocchi delle idrovore, dalle aperture sul Po e dalla foce del Po di Volano. Attualmente il Po di Goro contribuisce in maniera preponderante all'alimentazione sedimentaria della sacca, immettendo in mare circa 945.000 t/anno di sedimenti (Idroser, 1994) prevalentemente limosi ed argillosi (Dal Cin e Simeoni, 1984), ridistribuiti quasi esclusivamente verso Ovest.

La sacca e le aree limitrofe sono tuttora interessate da una forte subsidenza, incrementata da interventi antropici di varia natura ed entità.

Numerosi interventi antropici effettuati tra gli anni '50 ed '80 hanno interessato tutto il comprensorio lagunare, per la cui difesa sono state messe in opera difese aderenti e parallele lungo il margine di conterminazione e opere radenti sullo scanno.

Notevole importanza rivestono oggi le attività legate alla pesca, in particolare all'allevamento di mitili e vongole. La venericoltura è diffusa in quasi tutto il settore centro-occidentale della sacca e la raccolta, che avviene mediante rasche a mano, esercita un notevole impatto sul substrato sedimentario, determinandone il rimaneggiamento più volte nel corso dell'anno.

L'evoluzione storica dell'area è ben documentata (Barbujani, 1966, 1974; Ciabatti, 1966; Veggiani, 1974; Maestri, 1981; Bondesan, 1985, 1988; Simeoni et al., 1998a, 1998b). I punti salienti delle principali variazioni avvenute sono (Fig. 2):

1. Dopo il Taglio di Porto Viro (1598-1604) e con il successivo sbarramento del Po delle Fornaci (1612-1648) ha inizio la formazione del "delta moderno".
2. I primi segni della nascita della sacca di Goro si hanno verso la fine del XVIII secolo. In concomitanza con un generale protendimento del Delta del Po verso mare, a partire dal 1720 si sviluppa una penisola in corrispondenza delle foci del Po di Goro e del Po della Donzella.
3. Nel periodo 1750-1820 il delta, compreso il ramo del Po di Goro, si estende verso mare per altri 9 chilometri. Nella sua rappresentazione del 1808 (Barbujani, 1966) si denota un'insenatura tra le foci del Po di Goro e di Volano, che appare delimitata verso mare da un sistema segmentato di scanni e lidi.
4. Nel 1840-1850 si individua chiaramente la Sacca di Goro o Sacca dell'Abate, all'interno della quale sfocia il Canal Bianco.
5. Nel 1869 il Po di Volano è rappresentato per la prima volta con foce deviata verso l'interno della sacca. Non sono segnalati scanni sabbiosi in radice al Po di Goro, mentre le aree circumlagunari centrali ed orientali della sacca sono arginate e di tipo vallivo.
6. Nel 1896-1905 la sacca assume una forma molto vicina all'attuale, con profondità medie di 0.5-0.6 m al di sotto del limite di bassa marea. La foce del Volano, ormai assestata all'interno della sacca, presenta un piccolo delta frontale. Per la prima volta viene rappresentato lo scanno di Goro ben sviluppato e frammentato da numerose rotte. Dalla foce del Po di Goro, dove è presente un banco sabbioso, inizia a svilupparsi una nuova freccia litorale in direzione Ovest.
7. Nel 1932-1934 parte delle aree vallive del settore sud-orientale è sommersa e l'antico argine di Valle Gorino è rinsaldato al primo sistema di scanni. Il nuovo scanno è diviso in due grossi rami, delineando due aperture principali d'accesso alla Sacca di Goro. L'estremità settentrionale del Lido di Volano tende ad estendersi verso Nord, sotto forma di freccia litorale uncinata.

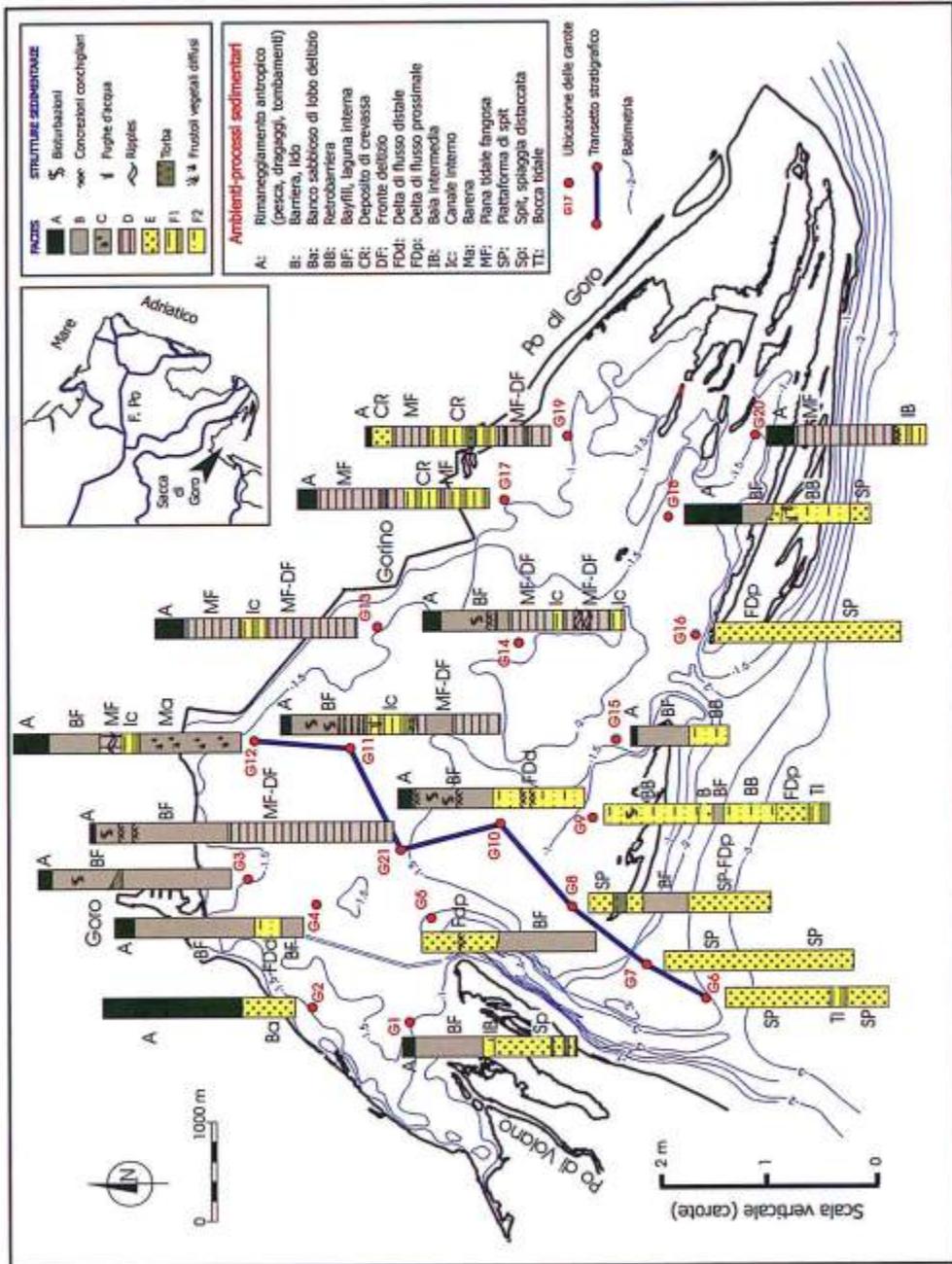


Fig. 1 - L'area di studio, nella quale è riportata la distribuzione areale delle facies, suddivise schematicamente nelle facies e subfacies fondamentali (per la descrizione dettagliata si rimanda al testo). Accanto a ciascuna carota sono indicate le sigle degli ambienti e i processi sedimentari desunti dall'analisi di facies.

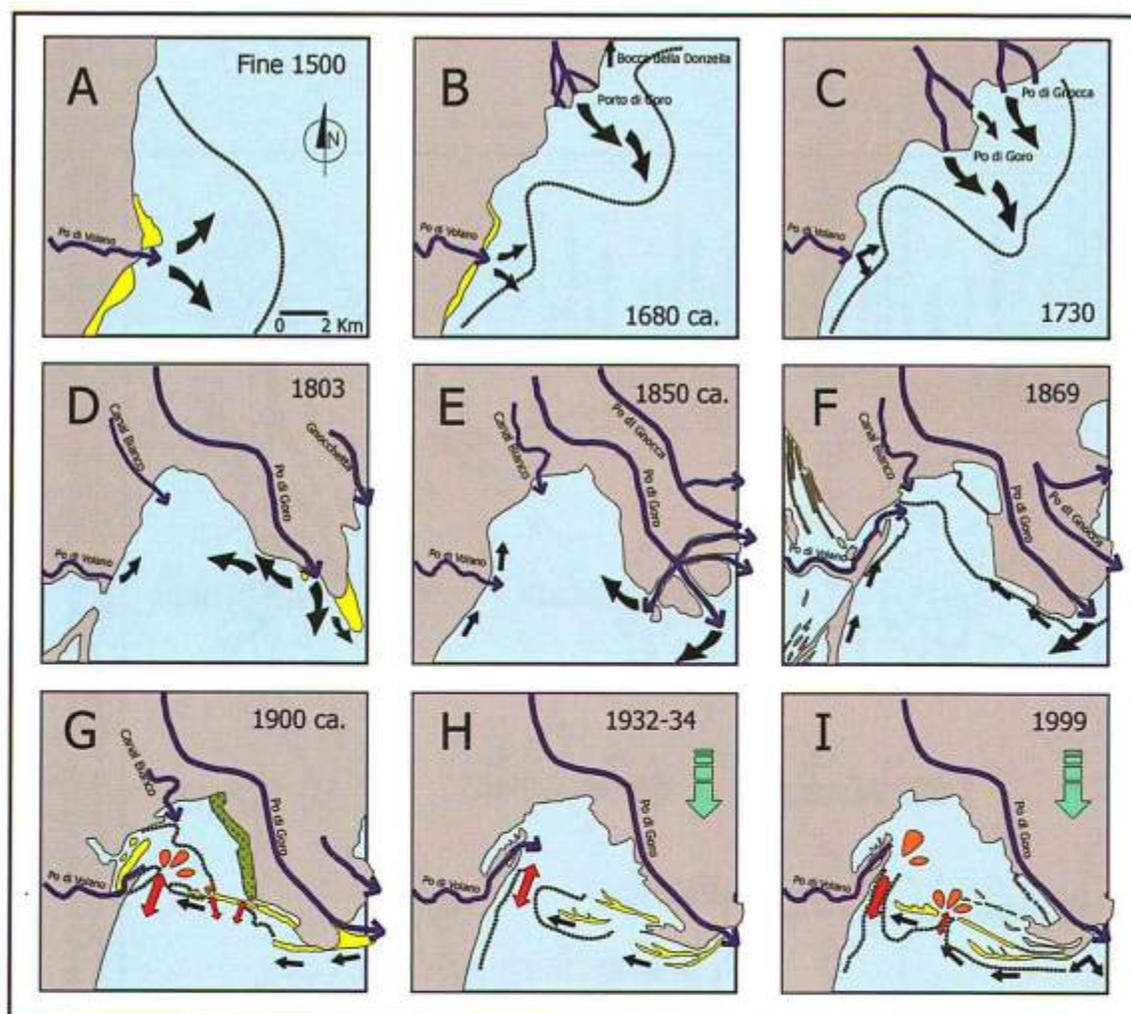


Figura 2 - Schema evolutivo dell'area del Po di Goro dalla fine del XVI secolo ad oggi. I riquadri delle figure sono riferiti sempre alla stessa area; a titolo indicativo sono riportate, in tratteggio, le configurazioni batimetriche delle basse profondità, intorno al metro. Le varie fasi sono desunte dai documenti cartografici storici, sia qualitativi che geodetici. A) Situazione alla fine del 1500: l'unico contributo solido a mare deriva dal protendimento del Po di Volano, con forte accumulo di sedimenti sul fronte deltizio. B) 1680 ca.: inizio dello sviluppo del Delta Moderno conseguente al taglio di Porto Viro. Il delta del Po di Volano tende ad arretrare, mentre inizia lo sviluppo del protendimento deltizio del Po di Goro e, poco a Nord, di quello del Po di Gnocca o della Donzella. C) 1730: il Po di Volano regredisce verso una posizione vicina all'attuale, mentre il delta coalescente di Goro e di Gnocca delinea una primitiva baia protetta. D) 1803: La Sacca di Goro risulta ben configurata ad Ovest del protendimento del fronte deltizio di Goro, con la configurazione tipica di baia aperta. L'area retrostante al Po di Volano assume un connotato paludoso, forse conseguente a fenomeni di subsidenza. E) 1850 ca.: il fronte deltizio del Po di Goro si protende ancor più verso mare, con un apparato piuttosto articolato. Da qui ai giorni nostri, seppur non sempre rappresentata, l'area retrostante al Volano mantiene le sue condizioni paralagunari. F) 1869: la foce del Po di Volano, a causa di una forte deriva litoranea verso Nord, devia all'interno della sacca, costruendo un piccolo apparato deltizio e scanni sabbiosi. La sacca risulta in parte "annegata" nel suo settore più nord-orientale. G) 1900 ca.: la sacca risulta parzialmente occlusa da sistemi di scanni che migrano dalla foce del Po di Goro in direzione del Volano. I margini interni della laguna mostrano delle aree barenicole ben sviluppate (verde). Gli interscambi idrici con il mare sono garantiti da numerosi sistemi di bocche tidali (frecche bidirezionali) e delta di flusso (indicati come lobi) che segmentano tutto lo scanno. E' ben delineato un nuovo scanno sabbioso che si protende e migra dalla foce di Goro verso Ovest. H) 1932-34: la fase di "annegamento" della Sacca di Goro è già iniziata, a causa della subsidenza (freccia verticale);

- 8) Nel 1949 la sacca presenta un connotato lagunare a causa del maggiore protendimento dello scanno, che mantiene il suo assetto segmentato in due grossi rami. L'estremità occidentale del ramo più distale è molto prossima al Lido di Volano.
- 9) Dal 1949 ad oggi si assiste principalmente ad un riassetto dello scanno, rimanendo grossomodo immutata l'estensione della sacca. Alla fine degli anni '70 quest'ultima si estende su un'area di circa 26-27 km<sup>2</sup> con profondità, riferite al livello medio del mare, di 1.2-1.5 m.
- 10) Nel periodo successivo al 1900 la subsidenza dell'area porta, per il settore della sacca, ad abbassamenti complessivi<sup>1</sup> dell'ordine di 160 cm.

Risulta quindi evidente che l'area del Po di Goro si è trasformata radicalmente a partire dalla fine del '600, passando da area di fronte deltizio rispetto all'aggetto rinascimentale del Po di Volano, ad un sistema di baia aperta interdistributrice (Shepard, 1956), almeno fino al 1850, per giungere ad un sistema via via più protetto, costituito oggi da una laguna subsidente. Le trasformazioni ambientali, dettate inizialmente dalla forte migrazione verso sud dell'aggetto deltizio di Goro, furono successivamente influenzate dalla progressiva protezione della baia da parte del sistema di scanni originatesi dall'apice deltizio.

### Materiali e metodi

Durante l'estate 1998 è stata eseguita un'indagine geognostica con prelievo di 21 carote di sedimento del diametro di 60 mm variamente distribuite all'interno della sacca (Fig. 1). Le carote sigillate sono state conservate in camera fredda alla temperatura di +5°C fino al momento del taglio per la successiva descrizione macroscopica, documentazione fotografica e subcampionamento. Le carote sono state sezionate longitudinalmente in modo da ottenere due emicilindri specularmente uguali; dei due emicilindri ottenuti, uno è stato immediatamente sigillato e riposto integro in camera fredda in attesa di essere radiografato. L'emicilindro su cui è stata effettuata la descrizione ed il subcampionamento è stato fotografato in luce artificiale, considerando sezioni utili di 40 cm di lunghezza. Tutte le immagini così ottenute sono state opportunamente rielaborate al computer per il montaggio dei singoli spezzoni di ciascuna carota.

Si è quindi proceduto alla descrizione macroscopica della carote per evidenziare le caratteristiche del sedimento quali il colore (valutato mediante confronto con le Munsell Soil Color Charts, Edizione 1975), il grado di omogeneità e d'idratazione, la tessitura, le strutture sedimentarie, l'attività biologica (bioturbazioni), la presenza di resti organici sotto forma di organismi integri, bioclasti, sacche decomposte e resti vegetali. Nella descrizione delle carote, i fanghi sono stati distinti in argillosi o siltosi in base al grado di compattazione e plasticità.

---

(Figura 2 - segue) ne consegue un assetto trasgressivo dell'area, con minor sviluppo degli scanni, riduzione delle aree barenicole e di alcune valli e minor efficienza degli apparati tidali. L'entrata principale della sacca è ampia e maggiormente soggetta all'ingressione marina durante le mareggiate. Il 1999: l'attuale Sacca di Goro mostra una esasperazione degli effetti di subsidenza con un'ulteriore riduzione delle aree emerse interne, soprattutto in vicinanza dell'alveo del Po di Goro. Lo scanno tende ad allungarsi, migrando verso SO, ma risulta meno robusto e fortemente assottigliato. La bocca principale riprende la sua efficienza; una seconda bocca, aperta dall'uomo pochi anni prima, è ben sviluppata soprattutto nel suo apparato interno di delta di flusso.

Nella descrizione delle carote, i fanghi sono stati distinti in argillosi o siltosi in base al grado di compattazione e plasticità.

---

<sup>1</sup> Caputo et al. (1970) e Bondesan e Simeoni (1983) indicano varie fasi di subsidenza per il periodo 1900-1974. Dati più recenti (Idroser, 1994) aggiornano i valori di subsidenza per il periodo 1984-93. Assumendo per i periodi mancanti i valori di abbassamento medio dei due periodi adiacenti (1975-1983: 13.1 mm/anno) o il tasso corrispondente al periodo antecedente (1994-oggi = 1988-1993: 29.6 mm/anno), l'abbassamento totale dall'inizio del secolo ammonta a 159.2 cm. Subsidenza ed eustatismo (ca. 21 cm di innalzamento del livello del mare dal 1850 ad oggi) portano a valori di circa 180 cm di abbassamento relativo.

In una fase successiva al taglio, si è provveduto a radiografare gli emicilindri integri di alcune delle carote che presentavano, già in fase descrittiva, ripetute variazioni tessiturali e strutture sedimentarie interessanti per un'interpretazione in chiave ambientale.

La sorgente di raggi-X utilizzata è costituita da un generatore unidirezionale Balteau Baltospot GFD 200/8. Il film usato è del tipo industriale, modello Agfa Structurix D4 con dimensioni 10 x 48 cm. La distanza tra la sorgente ed il film è stata fissata in 70 cm dopo alcune prove di sviluppo che si sono rese necessarie in fase di taratura per ottenere il contrasto migliore e quindi più adatto alla successiva interpretazione. Il tempo di esposizione scelto è stato pari a 25 s per una potenza di 5 mAs e 95 kV. I film ottenuti sono stati sviluppati utilizzando un processore Agfa-Gevaert Structurix NDT E con un tempo di attesa di 15 minuti. In totale sono state prodotte 49 radiografie, successivamente stampate in positivo su normale carta fotografica, rielaborate con PC tramite opportuno software e comparate con le immagini fotografiche.

### Analisi delle litofacies

Dall'analisi comparata tra le immagini dirette e radiografiche delle 21 carote raccolte, è stata evidenziata l'esistenza di tipologie sedimentarie ricorrenti e caratteristiche delle serie da sequenziali a non sequenziali (Terwindt, 1975). Una delle ricorrenze più evidenti è data dalla coltre sedimentaria più superficiale delle carote interne alla sacca, interessate dall'attività di venericoltura, con pesca effettuata per mezzo di rasche a mano. Il forte rimaneggiamento produce infatti un alto tasso di mortalità degli organismi che si preservano in aree spesso anossiche, dando al fango un connotato tipico, costituito da elevata idratazione e colorazione molto scura.

I sedimenti campionati mostrano, inoltre, caratteristiche da uniformi a differenziate, con trend trasgressivo, alternato o regressivo. In generale, nella coltre sedimentaria superficiale, predominano i resti di bivalvi e gasteropodi, interi o in frammenti; nelle porzioni basali delle carote interne alla sacca risultano più frequenti fanghi laminati pianoparalleli o a ripples.

Oltre ad una differenziazione verticale esiste una variazione complessiva di facies di tipo areale, data dalla dominanza di sedimenti più grossolani (sabbie e sabbie siltose) verso l'esterno della sacca, e di fanghi (silt argillosi e argille siltose) nelle aree più protette.

Sulla base della ricorrenza delle litologie associate alla tipologia delle strutture interne, alla presenza di livelli torbosi o resti diffusi di frustoli vegetali, nonché alla maggiore o minore caoticità determinata dalle bioturbazioni, è stato possibile riconoscere 6 facies principali. Nell'ambito di ciascuna facies possono essere riconosciute alcune differenze che, se di rilievo, assumono il connotato di subfacies, denotando la presenza di sottoambienti.

In Fig. 1 è riportato un quadro sinottico delle carote, con le indicazioni relative alle facies e subfacies fondamentali, qui di seguito descritte.

Dai processi desumibili dall'analisi delle facies si è quindi cercato di costruire uno schema interpretativo dell'evoluzione recente dell'area, degli ambienti intercorsi ed infine degli eventi o delle cause che ne hanno modificato l'assetto.

#### ***Facies di tipo A (Fig. 3a)***

##### *Descrizione:*

Fango o sabbia fangosa fortemente idrati, molto rimaneggiati e di colore scuro o molto scuro (nero 5Y 2.5/1 o grigio molto scuro 5Y 3/1). Questa facies non presenta strutture sedimentarie e caratterizza la parte sommitale della quasi totalità delle carote interne alla sacca, dove viene esercitata una forte azione meccanica di risospensione per la pesca di molluschi. In alcuni casi, come nella carota G2, lo spessore rimaneggiato è considerevole (circa 125 cm) e potrebbe quindi rappresentare il risultato dello sversamento di fanghi scavati. I resti conchigliari sono abbondanti, sparsi o in ammassi residuali (per es. in G3, G14 e G19).

*Ambiente e processi deposizionali:*

Rappresenta una forma obliterata di facies quasi sempre fangosa di tipo B o C e segnala lo spessore recente coinvolto nel rimaneggiamento antropico, che prevale nelle aree interne alla sacca.

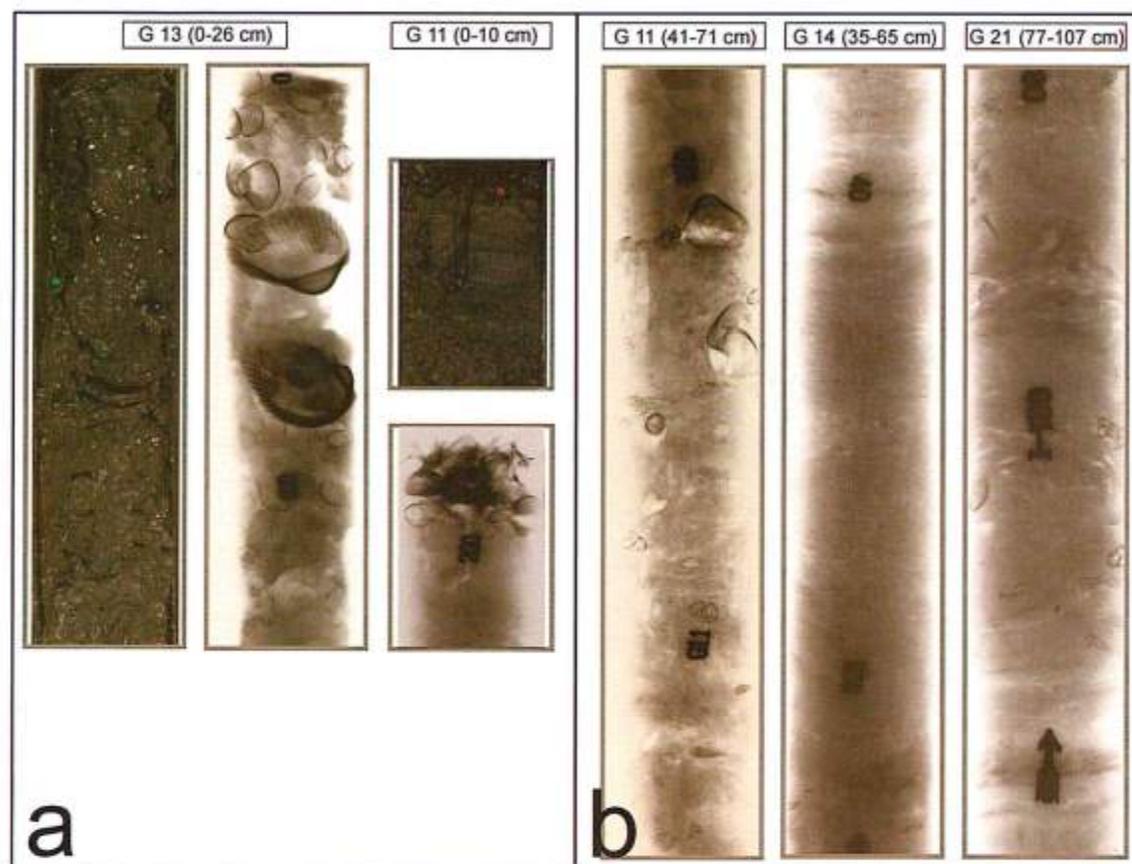


Figura 3 - a) Confronto tra fotografia e radiografia a raggi X (positivo) della parte sommitale delle carote G13 e G11, in cui è ben rappresentata la facies A. Già in fotografia la carota G13 mostra un elevato grado di idratazione ed un aspetto caotico del fango; le radiografie evidenziano l'assenza di strutture e la presenza di numerosi resti di bivalvi (tra i quali sono riconoscibili *Cerastoderma glaucum* e *Scapharca inequivalvis*) anche di grandi dimensioni. Nella carota G11 l'accumulo di resti conchigliari al top (deposito residuale) si presenta immerso in una matrice fangosa fortemente ridotta; più in profondità si nota una traccia di bioturbazione, legata ad un bivalve fossore che protende il sifone verso l'alto. b) Radiografie a raggi X (positivo) di alcune parti delle carote G11, G14 e G21, esemplificative della facies B. Si nota bene come questa facies si presenti quasi priva di strutture, bioturbata e molto ricca di resti conchigliari (bivalvi e gasteropodi). Nella G14 e alla base della G21 si notano le laminazioni sfumate ed in parte oblitrate dalle forti bioturbazioni.

**Facies di tipo B (Fig. 3b)***Descrizione:*

Fango o fango sabbioso, idrato, piuttosto compatto e di colore da grigio (5Y 5/1) a grigio molto scuro (5Y 3/1). Questa facies è sempre ricca di resti conchigliari, in frammenti o interi, e di resti vegetali sparsi o concentrati in livelli torbosi di colore più scuro (per es. in G3 e G14). E' inoltre molto bioturbata, ma quasi sempre priva di strutture: solamente in pochi casi sono state osservate delle laminazioni sfumate ed in parte oblitrate dalle forti bioturbazioni (per es. in G14), oppure delle strutture legate a fughe d'acqua collegate a rare intercalazioni sabbiose isolate (per es. in G5).

*Ambiente e processi deposizionali:*

Rappresenta fanghi di colmamento di depressione, tipici di *bayfill* – laguna, dove l'elevato tasso di sedimentazione tende ad inibire i processi selettivi operati dalle correnti e, viceversa, innesca un'elevata azione di disturbo da parte degli organismi fossori. L'assenza di stratificazione iniziale nei fanghi può essere dovuta ad un processo deposizionale piuttosto rapido da una sospensione che non è più mantenuta in carico dalle correnti (Collinson e Thompson, 1982).

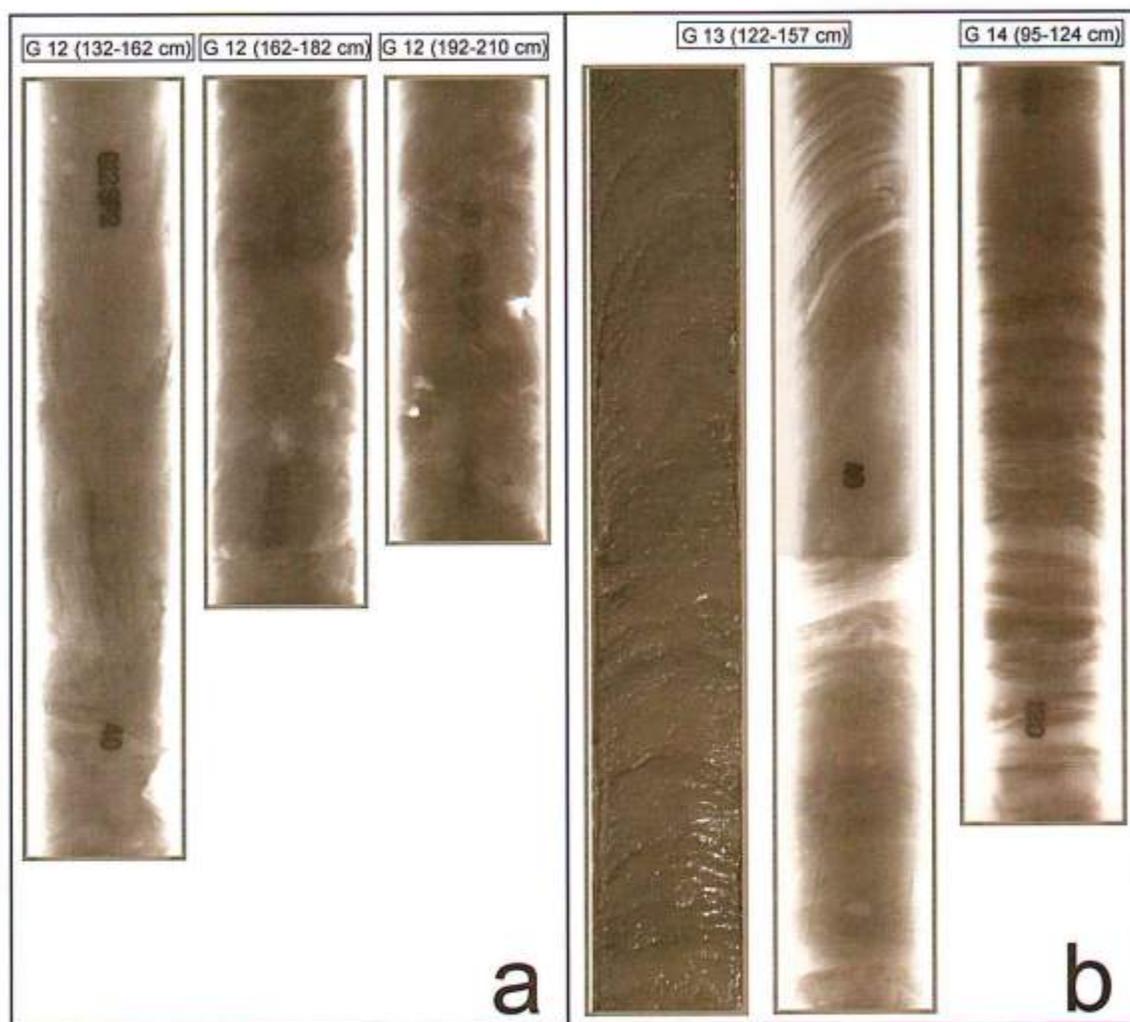


Figura 4 - a) Radiografie a raggi X (positivo) del secondo spezzone della carota G12, unico esempio della facies C. Il fango è compatto ma dall'aspetto maculato, con prevalente struttura fluidificata longitudinale. Le intercalazioni argillose irregolari sono di colore leggermente più chiaro. Non si notano strutture interne, mentre sono rarissimi i resti di molluschi. Macroscopicamente la facies C presenta molti resti vegetali e frustoli. b) Confronto tra la radiografia a raggi X (positivo) e la fotografia di una parte della carota G13, esempio della facies D. E' evidente l'alternanza delle laminazioni argillose (toni chiari) e siltose (toni scuri) che tendono a divenire convolute nella parte sommitale. La radiografia a destra rappresenta una parte della carota G14, in cui le laminazioni variano da pianoparallele a ondulate, con spessori delle lamine da millimetriche a centimetriche.

*Facies di tipo C (Fig. 4a)**Descrizione:*

Fango compatto, di colore grigio (5Y 5/1), di aspetto maculato (intercalazioni siltose irregolari a colorazione più chiara) forse legato a bioturbazioni o più probabilmente a fluimento d'acqua per

compressione. I resti e frustoli vegetali sono diffusissimi, mentre molto rari sono i frammenti conchigliari. Non sono evidenti strutture interne. Questa facies è rappresentata nella sola carota G12 (livello basale).

*Ambiente e processi deposizionali:*

La virtuale assenza di bivalvi e l'abbondanza di resti vegetali fa supporre ad un ambiente supratidale barenicolo, sommerso solo occasionalmente.

**Facies di tipo D (Fig. 4b e 5a)**

*Descrizione:*

Alternanza più o meno fitta di lamine di silt o sabbia fine di colore grigio scuro (5Y 4/1) e di lamine di materiale più fine, argilloso, di colore grigio (5Y 5/1). Queste lamine hanno spessori da millimetrici a centimetrici ma non sono sempre evidenti senza l'aiuto delle radiografie. I resti conchigliari e le bioturbazioni sono scarsi; solo in qualche caso sono stati rinvenuti livelli torbosi (per es. in G19). La Facies D è ben rappresentata in intervalli molto spessi nelle carote G21 (da cm 131 al fondo), G13 (da cm 101 al fondo), G14 (cm 76-121 e cm 129.5-174), G19 (da cm 121 al fondo) e G20 (cm 26-120).

*Ambiente e processi deposizionali:*

Rappresenta fanghi che sedimentano nell'area di fronte deltizio o nelle baie aperte al margine del fronte, in cui le laminazioni sono associate essenzialmente a variazioni di portata. Le laminazioni più sottili nelle porzioni più sommitali della facies D possono invece indicare sedimentazione dalla sospensione indotta dalle correnti tidali. La variazione d'intensità di queste correnti, con un concomitante debole rimaneggiamento, è infatti la responsabile più probabile di queste strutture (Thompson, 1975). In questo caso, si può presupporre un ambiente di piana di marea. Tutte le lamine sono distinguibili per il diverso cromatismo e variano di spessore in quanto legate a diversi gradi di energia al momento del deposito (Collinson e Thompson, 1982) o ad elevato carico sedimentario fine da parte della sorgente, sul quale può essere operata una selezione da parte del moto ondoso e delle correnti tidali. Nelle lamine siltose più spesse possono essere presenti anche strutture a ripples (per es. in G12 e G14) che testimonierebbero l'effetto di rimaneggiamento del fondale operato dal moto ondoso. Ove presente, questa facies è quasi sempre sovrastata dalla facies B, in modo sequenziale, indicando il progressivo annegamento della piana di marea per subsidenza ed il suo concomitante riempimento (*bayfill*).

**Facies di tipo E (Fig. 5b)**

*Descrizione:*

Sabbia o sabbia fangosa massiva di colorazione variabile da grigio scuro (5Y 4/1), grigio verdastro scuro (5GY 4/1), grigio oliva scuro (5Y 3/2) a grigio molto scuro (5Y 3/1), in cui le strutture sedimentarie sono rarissime. Sono abbondanti i bioclasti (bivalvi e gasteropodi in prevalenza) talora concentrati in livelli (per es. in G2 e G6); rare le intercalazioni torbose (per es. in G1). In alcuni casi (per es. in G7 e G16) sono stati osservati alcuni noduli fangosi che testimoniano l'erosione di livelli fangosi compattati, comuni sui lati erosivi di canali tidali o nelle aree di piana tidale limitrofa alle imboccature lagunari.

*Ambiente e processi deposizionali:*

La facies sabbiosa massiva rappresenta, nella maggior parte dei casi, i depositi che appartengono al sistema esterno della baia. Localmente lo stesso tipo di deposito può costituire la coltre di copertura di piattaforma di spit, dei lidi e scanni, di bocca tidale in colmamento o poco efficiente, oppure dei suoi fianchi, nel caso di maggior efficienza. Raramente (top carota G19) può essere associato alla facies prossimale di depositi di crevassa, in vicinanza di un argine fluviale; solo in questo caso la facies si presenta pressoché sterile.

I livelli conchigliari rappresentano sempre livelli residuali, legati sia allo stazionamento del livello marino sulle barriere-lidi o sul margine delle piattaforme di spit e delle morfologie di alto di bocca

lagunare (barre lineari di margine di canale), sia alle fasi di sovraescavazione delle bocche tidali e dei canali lagunari.

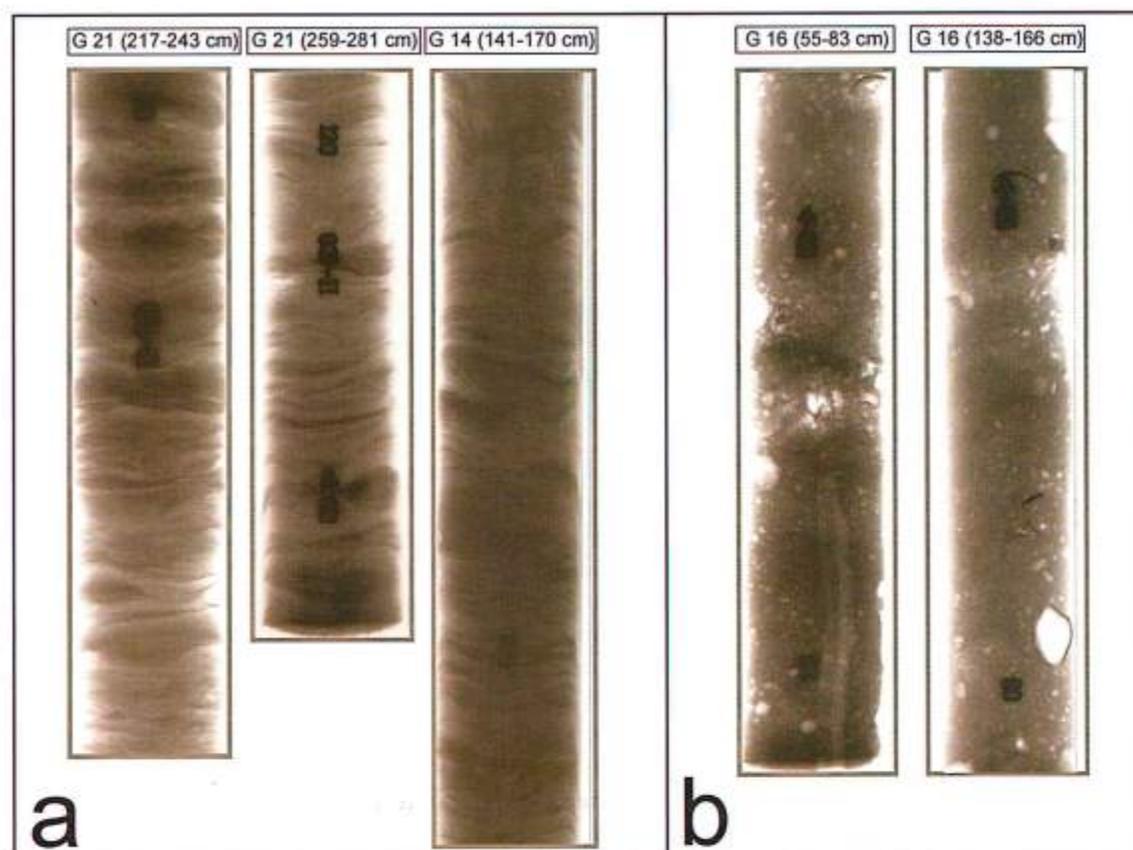


Figura 5 - a) Radiografie a raggi X (positivo) di due parti della carota G21 e di una parte della carota G14 in cui sono ben rappresentate le sequenze siltoso-argillose laminare della facies D. La laminazione prevalente è di tipo ondulato non parallelo. Al top della radiografia della carota G14 si può notare un'incremento di fluidificazione del fango che tende ad obliterare l'assetto laminato. b) Radiografie a raggi X (positivo) di due parti della G16 in cui è rappresentata la facies E. La sequenza è data da sabbie massive prive di strutture sedimentarie e ricche di frammenti conchigliari. Le chiazze chiare longitudinali sono discontinuità del sedimento lungo il liner (vuoti), mentre le bolle chiare rappresentano probabilmente noduli di fango arrotondati dal moto ondoso.

La presenza di torba intercalata in questa facies testimonia delle fasi paralagunari associate alla migrazione di una freccia litorale, o il passaggio alternato da stadio di barriera a retrobarriera, che favorisce lo sviluppo algale in ambiente più protetto.

### ***Facies di tipo F***

#### *Descrizione:*

Questa facies è litologicamente di transizione tra quella fangosa D e quella sabbiosa E. Possono essere distinte due subfacies, in relazione alle strutture interne:

- 1) subfacies F<sub>1</sub> (per es. in G11, G12, G13 e G20) (Fig. 6a);
- 2) subfacies F<sub>2</sub> (per es. in G4 e G9) (Fig. 6b).

La prima è rappresentata da sabbia fine talora siltosa, spesso di colore grigio molto scuro (5Y 3/1) o grigio scuro (5Y 4/1) con intercalazioni fangose di colore grigio (5Y 5/1) o grigio oliva (5Y 4/2),

che si presentano a plaghe, a lenti o a livelli di spessore massimo di qualche centimetro. I resti conchigliari sono rari; del tutto assenti quelli vegetali.

La seconda è costituita da sabbia fangosa massiva di colore grigio scuro (5Y 4/1) o grigio oliva scuro (5Y 3/2), che presenta spesso gradazione normale. I resti conchigliari, in frammenti o interi, sono abbondanti e, talvolta, accompagnati da resti vegetali.

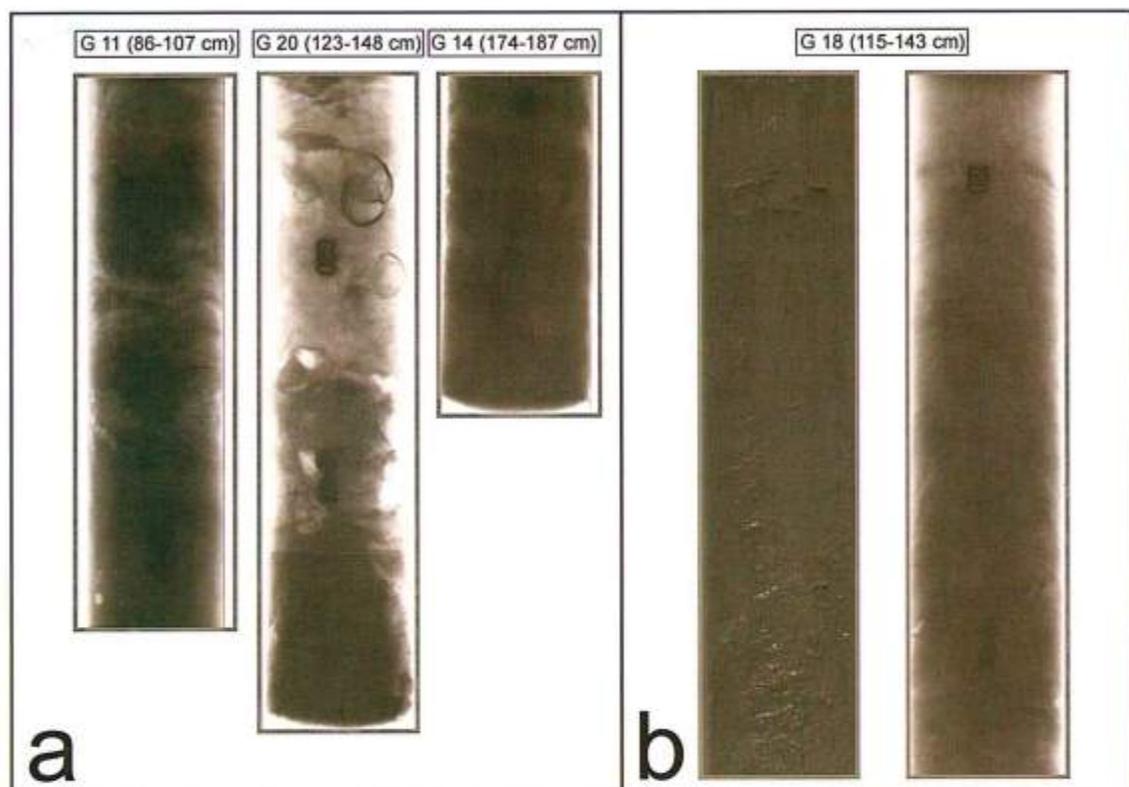


Figura 6 - a) Radiografie a raggi X (positivo) di una parte della carota G11, una della carota G20 ed una della carota G14, rappresentative della facies F<sub>1</sub>. Quest'ultima è costituita da sabbie fini talora siltose, con intercalazioni fangose di colorazione più chiara e rari resti conchigliari. b) Confronto tra la radiografia a raggi X (positivi) e la fotografia di una parte della carota G18 in cui è rappresentata la facies F<sub>2</sub>. Il sedimento è una sabbia siltosa pressoché massiva e, nel caso in esame, apparentemente sterile.

#### *Ambiente e processi deposizionali:*

La facies F<sub>1</sub> risulta normalmente associata alle serie più fini, sia in ordine sequenziale del tipo *fining upward* (tipicamente nelle carote G20 e G17; parzialmente anche nella carota G14), sia non sequenziale, come le intercalazioni rinvenute nelle carote interne (G11, G12 G13 e G14). Nel primo caso può essere testimonianza della maggiore energia dell'ambiente tidale di baia intermedia nei primi stadi della sequenza temporale baia → laguna → *bayfill* (subsidente); nel secondo caso, essere il prodotto di eventi di maggior energia o di maggior carico terrigeno nella fase intermedia della stessa sequenza temporale o rappresentare i depositi associati al processo di riattivazione di canali interni. Lo stesso tipo di sedimento, in vicinanza dell'asta fluviale, può rappresentare la facies intermedio-distale di depositi di crevasse (G19). Se intercalato alle sequenze sabbiose di tipo E, in ambiente di bocca tidale, può marcare sia gli stadi di minor efficienza idraulica, sia eventi di migrazione verso condizioni di sottoflutto alla deriva litoranea.

La facies F<sub>2</sub> si presenta sovrastata, con passaggio graduale, dalla facies sabbiosa, oppure, con limite netto, da quella di *bayfill*. Costituisce in genere il deposito in ambienti di media energia, a rapida evo-

luzione, legato alla normale transizione tra le sabbie di baia esterna ed i fanghi di interno baia, in vicinanza degli apparati di delta di flusso, alle spalle dei lobi di *spillover*, nelle aree di retrobarriera o di interbanco. Per la caratteristica massiva della facies F<sub>2</sub> si possono escludere processi di elaborazione da parte delle correnti tidali, mentre risultano più probabili i processi di accrescimento o di colmamento repentino.

### Discussione e considerazioni conclusive

Il sistema della Sacca di Goro nel suo insieme va considerato come un'area di baia interna a margine del fronte deltizio del Po di Goro, documentato a partire dal 1803. A tutto il periodo antecedente vanno quindi associati sedimenti di fronte deltizio, legati inizialmente al forte protendimento del Po di Volano (fine 1500: Bondesan, 1985) e, solo dopo il taglio di Porto Viro, al Po di Goro. I sedimenti rinvenuti alla base di alcune carote interne alla sacca (facies D: carote G21, G11, G13, G14 e G19) testimoniano questa fase.

Al periodo di massima espansione del fronte (antecedente il 1850) vanno associati i depositi sabbiosi alla base delle carote più prossime alla foce del Po di Volano (G1 e G2), ove si estendeva originariamente la freccia litorale in accrescimento ai lati della foce, ora retrattasi e relegata in posizione marginale. La foce, deviando bruscamente verso Est ed immettendosi poi a mare in direzione Sud, delineava un piccolo delta e scanni sabbiosi, prossimi all'attuale conterminazione lagunare occidentale. E' probabile che le sequenze delle carote più esterne, a mare della direttrice compresa tra i punti corrispondenti a G2-G10-G18, siano più recenti di tale periodo, mentre quelle interne mostrano un intervallo basale dominato da facies di piana di marea, localmente da facies di canale (G17, G19) e, solo al margine più settentrionale, da sedimenti tipici di barena (G12).

Il successivo sviluppo stadiale dello scanno, inizialmente a forma di sistemi sfrangiati di isole-barriera/scanni e bocche/rotte (1905), relega la sacca in una posizione protetta, con interscambi idrici regolati dalle aperture lungo i lidi; l'azione delle correnti di marea può conseguentemente attivare o riattivare reticoli di canali alimentati dalle bocche tidali (facies F<sub>1</sub> nelle carote G11, G12, G13, G14).

L'occlusione ha l'effetto di generare un ampio delta di flusso in corrispondenza del varco più prossimo alla costa del Lido di Volano, creando in questo modo serie non sequenziali negative (Terwindt, 1975) come nella carota G5.

Nell'ultimo secolo le maggiori modificazioni sono imputabili a due effetti concomitanti: la subsidenza e il fluttuante avanzamento dello scanno. Ad una fase iniziale di retrocessione della barriera (1934) è seguito infatti un progressivo allungamento; a partire dallo stesso periodo la sacca inizia ad approfondirsi soprattutto nel suo settore centrale, ove ancora attualmente sono presenti i maggiori battenti d'acqua. Se dal lato più prossimo al fronte deltizio di Goro e lungo lo scanno gli effetti della subsidenza sono mitigati dall'elevato carico sedimentario in gioco, nel settore interno l'abbassamento, solamente in parte compensato da sedimentazione, produce una trasformazione ambientale di forte rilievo, sommergendo le aree supratidali interne e le piane di marea, e relegando quest'ultime ad un ambiente subtidale. In queste aree, contraddistinte da una minore energia, tende a decantare il materiale fine trasportato dal Po di Goro e, subordinatamente, dal Po di Volano, sotto forma di depositi fangosi massivi e molto bioturbati, a cui è stato attribuito il termine di facies *bayfill*.

Le serie complete di tipo sequenziale positivo che interessano le già citate carote del settore centrale, sono la testimonianza del processo di occlusione ed "annegamento". Viceversa, le carote più prossimali, cioè quelle più esterne alla sacca, rappresentano fasi evolutive molto recenti, legate quasi essenzialmente al sistema barriera-retrobarriera e bocca tidale-delta di flusso. In questo ambito sono facilmente distinguibili le facies francamente sabbiose (Facies E) di freccia litorale e di piattaforma di spit (sommità della G6, G7, G8; base della carota G18 e G18) e di delta di flusso prossimale (G5, G16), questi ultimi marcati dalla occasionale presenza di livelli conchigliari residuali. Nelle porzioni interne della sacca, di transizione alle facies di *bayfill*, dominano sabbie fangose di tipo F<sub>2</sub>, rap-

presentative di ambienti di retrobarriera (G9, G15) o di delta di flusso distale (G10 e, marginalmente, G4).

Solo nei sistemi di scanni abbandonati o nelle aree immediatamente a Nord dell'imboccatura principale, la sequenza prosegue in termini positivi, come nel caso della carota G18, tipico esempio di migrazione del sistema da esterno ad interno (*spit* → retrobarriera → laguna), o della carota G4 (delta di flusso distale → laguna).

A fenomeni prettamente locali di esondazione, a cui si sono sommati recentemente gli effetti delle dispersioni sedimentarie dalle chiuse prossime all'argine, vanno imputati alcuni livelli sabbiosi talora laminati ed intercalati a fanghi, rinvenuti nelle carote G17 e G19, interpretati come depositi di crevasse.

Il rimaneggiamento dovuto alla forte pressione antropica (attività di allevamento e pesca di bivalvi, escavazioni e tombamenti) è oggi il maggior responsabile dell'alterazione superficiale dei depositi, in cui manca ogni connotato naturale e in cui predominano ammassi di gusci e resti organici, spesso in avanzato stadio di decomposizione (Facies A).

Uno schema stratigrafico-evolutivo di sintesi della Sacca di Goro viene proposto in Fig. 7. Lo schema prende in considerazione solamente il tratto meno affetto da fenomeni di sedimentazione locale, escludendo quindi alcune facies legate ad oscillazioni del sistema dei banchi o all'esondazione fluviale.

Pur non essendo disponibile un dato relativo ai tassi di sedimentazione, è plausibile supporre che lo spessore sedimentario indagato attraverso le carote prelevate, corrisponda ad una finestra temporale molto recente (centennale), soprattutto a causa dell'elevato carico solido che ha portato allo sviluppo del delta del Po di Goro. Le carote raccolte, inoltre, sono distribuite anche nelle aree di retrobarriera e di piattaforma di spit, che sono soggette a repentine trasformazioni anche a micro (annuale) scala temporale, attraverso migrazioni di potenti coltri sedimentarie sabbiose. Con riferimento ai materiali che sedimentano all'interno della sacca, tenuto conto dell'attuale assetto morfologico rispetto a quello di fine secolo scorso, della subsidenza e dell'eustatismo, si può stimare che il prisma sedimentario fangoso accumulato negli ultimi 100 anni ammonti a non meno di 80 cm, con un tasso di sedimentazione medio pari a circa 8 mm/anno.

Tale stima appare verosimile, considerato che si giunge allo stesso ordine di grandezza (da 7 a 9.2 mm/anno) attraverso confronti basati sulle stime degli apporti torbidi del Po di Goro riportate da Idroser (1994) e che Fagioli et al. (1991) ritengono troppo bassi i valori di 1-5 mm/anno.

Come si può notare, lo schema è quello tipico di zone paraliche e dei sistemi barriera-laguna (Duffy et al., 1989). La particolarità dell'area è quella di presentare una zona barenicola molto ridotta nella sua evoluzione, imputabile sia al fatto che le vecchie barene si estendevano molto più all'interno dell'area di indagine, come testimoniato dalla documentazione storica, sia all'eccessiva crescita del fronte deltizio del Po di Goro, che non ha favorito il completo sviluppo dei sistemi barenicoli.

Nella figura è indicata, inoltre, la linea isocrona relativa agli ultimi 100 anni. In mancanza di datazioni di taratura, l'isocrona 1900 è stata tracciata partendo dall'area più esterna e utilizzando il confronto batimetrico con le carte storiche, tenuto conto dei valori di subsidenza ed eustatismo e computando 50 cm di correzione ai dati batimetrici storici (rappresentati rispetto alla bassa marea).

I depositi di barriera sono limitati alla base da fanghi laminati di fronte deltizio-baia aperta, segnalati da Idroser (1994). I punti blu rappresentano la taratura dell'isocrona relativa solamente alla parte di massima crescita dello scanno.

Per il settore interno alla sacca, è stato assegnato come isocrona il limite di facies B-D, cercando di mantenere uno spessore minimo rappresentativo del tasso di sedimentazione medio di 8 mm/anno. Considerata la caratteristica sequenziale delle successioni interne, marcata dalla transizione Facies D- Facies B, è verosimile associare ai livelli basali di fronte deltizio-baia aperta un tasso di sedimentazione superiore. Secondo Nittrouer et al. (1984), infatti, solamente un elevato carico sedimentario riesce a limitare la produttività primaria, ed inibire i processi vitali degli organismi bentonici responsabili del rimescolamento e delle bioturbazioni. Per tali ragioni è stata riportata, solo indicativamente,

te, anche l'isocrona relativa al 1850, idealizzata supponendo un tasso di sedimentazione doppio per il periodo contraddistinto da maggiori portate del Po di Goro e da una minor efficienza dei processi di costruzione della barriera.

In questo caso, le facies intercettate nell'area interna corrispondono a piana di marea e fronte del delta, precedenti all'annegamento e al riempimento con fanghi di bayfill - laguna.

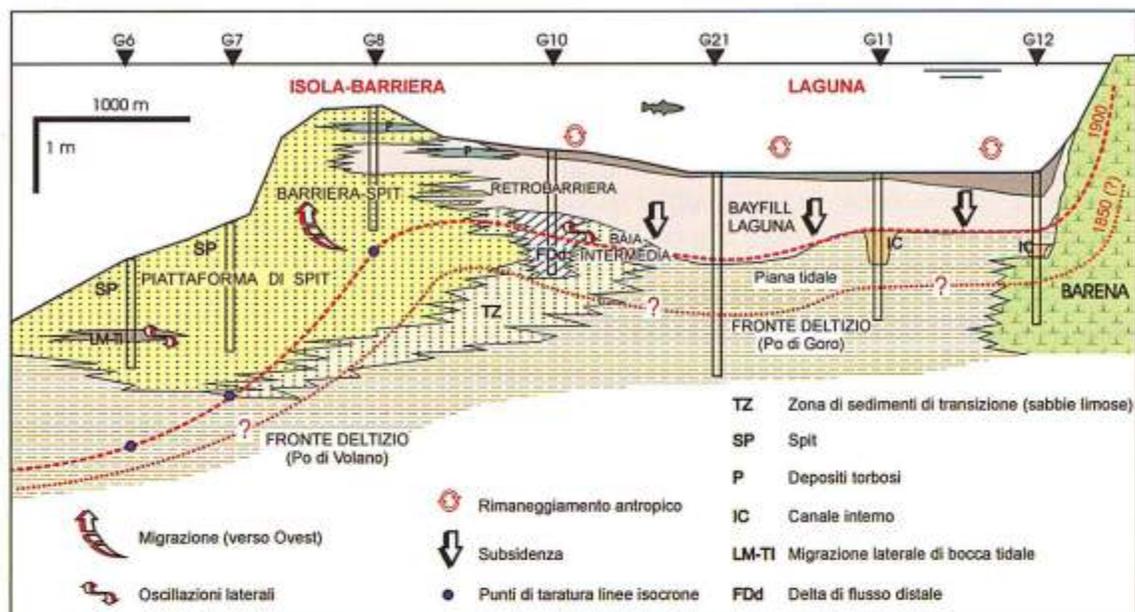


Figura 7 - Schema stratigrafico-evolutivo della Sacca di Goro (cfr. Fig. 1 per l'ubicazione del transetto e per la legenda relativa alle carote). La configurazione è quella tipica dei sistemi barriera-laguna, che nel caso in esame è controllato dal bilancio tra carico terrigeno e subsidenza. All'interno della sacca può essere assunto un tasso di sedimentazione non inferiore a 8 mm/anno, che solo in parte ha compensato abbassamenti relativi (subsidenza + eustatismo) di circa 180 cm durante l'ultimo secolo. Sono riportate indicativamente anche le due linee isocrone relative al 1900 e al 1850 (cfr. testo per una spiegazione di dettaglio).

### Ringraziamenti

Si ringraziano G.B. La Monica e P. Bellotti per le utili osservazioni e la revisione critica del manoscritto. Lavoro eseguito nell'ambito delle ricerche MURST 60% (Resp. R. Marocco), COFIN 98 (Responsabili R. Dal Cin e G. Fontolan) e con supporto finanziario della Regione Emilia Romagna (Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7, Resp. U. Simeoni).

### Bibliografia

- Barbujani R. (1966) - *Nascita e sviluppo del Delta Padano*. Padusa, Rivista del Centro Polesano di Studi Archeologici ed Etnografici, Rovigo, 4: 3-15.
- Barbujani R. (1974) - *Nascita e sviluppo del Delta Padano*. La Garangola, Padova. pp. 78.
- Bondesan M. (1985) - *Quadro schematico dell'evoluzione geomorfologica olocenica del territorio costiero compreso tra Adria e Ravenna*. Atti della Tavola Rotonda "Il Delta del Po", Sezione Geologica, Bologna 24 novembre 1982: 23-36.
- Bondesan M. (1988) - *Aspetti e problemi geomorfologici del territorio del delta padano: 2a Escursione - Delta del Po*. In: Bondesan M., Elmi C., Nesci O., Dal Cin R. e Veggiani A. (a cura di) Guida alle escursioni. Gruppo Nazionale di Geografia Fisica e Geomorfologia, Riunione Annuale, Riccione-Delta del Po, 21-24 giugno 1988: 31-58.
- Bondesan M. e Simeoni U. (1983) - *Dinamica e analisi morfologica statistica dei litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta*. Memorie di Scienze Geologiche, 36: 1-48.

- Caputo M., Pieri L. e Unguendoli M. (1970) - *Geometric investigation of the subsidence in the Po delta*. Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata, Trieste, 13: 187-207.
- Ciabatti M. (1966) - *Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano*. Giornale di Geologia, 34: 1-27.
- Collinson J.D. e Thompson D.B. (1982) - *Sedimentary structures*. George Allen & Unwin, London. pp. 194.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1984) - *Variazioni volumetriche del delta padano nell'ultimo secolo, distribuzione dei sedimenti nei rami deltizi e caratteri granulometrici dei materiali cavati nel basso Po*. 2° Convegno di Idraulica Padana, Parma 15 - 16 Giugno 1984, 8: 254-279.
- Duffy W., Belknap D.F. e Kelley J.T. (1989) - *Morphology and stratigraphy of small barrier-lagoon systems in Maine*. Marine Geology, 88: 243-262.
- Fagioli F., Landi S., Locatelli C. e Vecchietti R. (1991) - *Valutazione del carico di metalli nelle acque, nei sedimenti e nei principali organismi accumulatori*. In: Bencivelli S. e Castaldi N. (a cura di) Studio Integrato sull'Ecologia della Sacca di Goro. Provincia di Ferrara, FrancoAngeli, Milano. pp. 135-172.
- Idroser (1994) - *Aggiornamento ed integrazione del piano progettuale per la difesa della Costa Adriatica Emilia-Romagnola*, Relazione Generale. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp. 276.
- Maestri D. (1981) - *Goro e il Delta del Po*. Università degli Studi di Roma, Istituto di Fondamenti dell'Architettura, 1981. pp. 444.
- Nittrouer C.A., DeMaster D.J. e McKee B.A. (1984) - *Fine-scale stratigraphy in proximal and distal deposits of sediment dispersal systems in the East China Sea*. Marine Geology, 61: 13-24.
- Shepard F.P. (1956) - *Marginal sediments of the Mississippi delta*. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 40: 2537-2623.
- Simeoni U., Ciavola P., Fontolan G., Mazzini E. e Tessari U. (1998a) - *Centennial evolution of a recurved spit: a case study from the spit of the Goro lagoon, Po delta (Italy)*. 35<sup>th</sup> CIESM Congress Proceedings, Dubrovnik, vol. 35 (1). pp. 100-101.
- Simeoni U., Borghesi A., Calderoni G., Ciavola P., Fontolan G., Gatti M., Gonella M., Tessari U. e Zamariolo A. (1998b) - *Analisi previsionale dell'evoluzione dello Scanno e della Sacca di Goro*. Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7, Relazione Finale, Ferrara. pp. 273.
- Simeoni U., Dal Cin R., Fontolan G. e Tessari U. (2000) - *Morfogenesi ed evoluzione dello scanno di Goro (delta del Po)*. Studi Costieri, questo volume.
- Terwindt J.H.J. (1975) - *Sequences in insbore subtidal deposits*. In: R.N.Gingsburg (Ed.) Tidal deposits. Springer-Verlag, Berlin. pp. 85-89.
- Thompson R.W., 1975. *Tidal-flat sediments of the Colorado River Delta, northwestern Gulf of California*. In: R.N.Gingsburg (Ed.) Tidal deposits. Springer-Verlag, Berlin. pp. 57-65.
- Veggiani A. (1974) - *Le variazioni idrografiche del basso corso del Po negli ultimi 3000 anni*. Padusa, Rivista del Centro Polesano di Studi Archeologici ed Etnografici, Rovigo, 1-2: 39-60.

Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 26/3/2000.

## Aspetti geochimici dei sedimenti della Sacca di Goro (Delta del Po, Adriatico settentrionale)

Stefano Covelli<sup>1</sup>, Giorgio Fontolan<sup>1</sup>, Loris Sartore<sup>2</sup>,  
Umberto Simeoni<sup>3</sup>, Virginie Tesolin<sup>1</sup> e Andrea Zamariolo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine,  
Università degli Studi di Trieste, via E.Weiss, 2 - 34127 Trieste

<sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e Chimica Applicata,  
Università degli Studi di Trieste, via A.Valerio, 2 - 34127 Trieste

<sup>3</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche,  
Università degli Studi di Ferrara, C.so Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara

### Riassunto

Lo studio prende in esame le caratteristiche geochimiche dei sedimenti, analizzate secondo la normativa vigente, di 21 carote prelevate nella laguna di Goro. Su un totale di 131 campioni sono state eseguite analisi del contenuto di alcuni elementi maggiori (Al, Fe, Ti) ed in tracce (P, Li, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg), insieme al contenuto di C organico, N totale ed oli minerali. L'elaborazione statistica dei dati chimici e tessiturali ha consentito una valutazione del grado di alterazione antropogenica dell'ambiente lagunare.

Pur essendo le concentrazioni di alcuni metalli pesanti relativamente basse rispetto ad altre aree lagunari dell'Adriatico, ciò nondimeno i valori significativi di arricchimento nei livelli superficiali (circa 70-90 cm) per Hg (> 5), Cd e Pb (> 4), Zn e Cu (> 2), indicano un palese deterioramento delle caratteristiche naturali dei sedimenti e, quindi, delle qualità ambientali, che potenzialmente potrebbe ripercuotersi sulla componente biologica della laguna.

### Introduzione

L'elevato grado d'urbanizzazione e la concentrazione di siti industriali lungo i fiumi e nelle aree costiere ha inevitabilmente contribuito ad aumentare la presenza di sostanze contaminanti (metalli pesanti, PCB, idrocarburi, radionuclidi) nell'ecosistema marino (Förstner, 1977; Windom, 1992). La definizione degli obiettivi del risanamento ambientale e degli interventi da realizzarsi per raggiungere le condizioni ottimali di qualità delle acque non può prescindere da una conoscenza globale, e non settoriale, dell'ecosistema in cui i risultati degli studi delle singole componenti (chimiche, fisiche, biologiche, geologiche, idrauliche, ecc.) vengono tra loro integrate (Förstner, 1977; Salomons e Förstner, 1984).

La Sacca di Goro è un'area lagunare localizzata nel settore più meridionale del delta del Po e rappresenta un'importante fonte di ricchezza sia come bene naturalistico sia per l'attività di pesca (venericoltura e mitilicoltura). Per tali ragioni la sacca continua ad essere al centro di programmi di tutela e salvaguardia ambientali, ed è stata oggetto, nel recente passato, di numerose indagini ecologiche (Pugnetti et al., 1992; Viaroli et al., 1992) e di studi sullo stato e sulla qualità delle acque e dei sedimenti (Fagioli et al. 1991, 1994).

Lo scopo di questo lavoro è quello di analizzare lo stato di alterazione antropica dei sedimenti di fondo in relazione ad alcuni parametri geochimici significativi, per individuare eventuali aree di preferenziale accumulo di metalli pesanti.

### Area di studio

La laguna di Goro presenta un'estensione di circa 2000 ettari (Idroser, 1994). La profondità media del battente d'acqua supera appena il metro, mentre i valori di escursione della marea variano da un minimo di - 40 cm ad un massimo di + 80 cm. La sacca fa parte dell'apparato deltizio del Po e deve la sua origine al protendimento dello stesso. La dinamica naturale è caratterizzata dalla presenza di bassi fondali e dalla distribuzione dei sedimenti determinata dal moto ondoso. Una forte subsidenza naturale, incrementata in tempi recenti da numerose attività antropiche, ha interessato ed interessa tuttora il bacino deltizio e l'area circostante (Caputo et al., 1970; Bondesan e Simeoni, 1983).

La sacca è alimentata principalmente dagli apporti solidi del Po di Goro e di Volano, e, subordinatamente, dal Po di Pila e di Tolle e dai materiali che risalgono la costa emiliano-romagnola. Le indagini sui sedimenti superficiali della Sacca di Goro (Dal Cin e Pambianchi, 1991; Simeoni et al., 1998; Tesolin, 1999) hanno evidenziato che i sedimenti argillosi e limosi sono i più rappresentativi dei fondali lagunari, mentre le sabbie sono presenti solo in prossimità della bocca principale e nella parte orientale della sacca. Poiché dalle caratteristiche tessiturali dei sedimenti dipende anche la capacità da parte delle particelle di intrappolare eventuali contaminanti (Frenet-Robin e Ottmann 1978; Ramamoorthy e Rust 1978; Fernex et al. 1986), sono proprio le zone più interne della sacca che presentano condizioni particolarmente favorevoli ad eventuali alterazioni ambientali.

### Metodologie di analisi

Nell'estate del 1998 sono state prelevate 21 carote di sedimento (Fig. 1) e sottoposte ad analisi dettagliate, in accordo con i requisiti stabiliti dal Decreto del Ministero dell'Ambiente 24 gennaio 1996 (G. U. n. 31, pp. 9-29). Il subcampionamento dei sedimenti per le analisi fisiche e chimiche è stato eseguito applicando i criteri stabiliti dalle disposizioni legislative riportate nello stesso decreto (All. B/1):

per le carote di lunghezza < 150 cm sono state prelevate le porzioni di sedimento relative ai 20 cm superficiali e 20 cm di fondo;

per carote con lunghezza compresa tra 150 e 200 cm sono stati prelevati campioni relativi ai 20 cm superficiali, 20 cm intermedi e 20 cm di fondo;

per le carote con lunghezza >200 cm, oltre ai campioni indicati al punto precedente, è stato campionato uno spessore di 20 cm rappresentativo dei livelli più profondi di 200 cm.

Complessivamente sono state effettuate 131 analisi tessiturali: 3 campioni per le carote dalla G1 alla G19, ad eccezione della G15 con due soli campioni, 32 per la carota G18 e 45 per la G21. Queste ultime due per l'ubicazione, la lunghezza e le caratteristiche macroscopiche del sedimento sono state considerate le più adatte per uno studio di dettaglio, necessario per la taratura della metodologia d'indagine.

I subcampioni prelevati sono stati trattati con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (10 v/v) per l'eliminazione della sostanza organica. Tramite setacciatura ad umido si è separato il fango (< 63 µm) dalla sabbia. Una piccola aliquota di fango è stata successivamente diluita con l'antiflocculante Calgon (Na-esametafosfato allo 0.5 ‰), per poter eseguire l'analisi dimensionale mediante sedigrafo Micromeritics mod. 5100.

I sedimenti, calcolate le percentuali di ciascuna delle loro componenti fondamentali secondo la scala dimensionale di Udden-Wentworth (2000-62 µm sabbia, 62-4 µm silt e < 4 µm argilla), sono stati infine classificati per mezzo del diagramma di Shepard (1954). E' stata inoltre calcolata la percentuale del materiale con dimensioni minori di 2 µm necessaria per le tarature geochimiche e la determinazione dei grain-proxies (Loring 1990, 1991; Covelli e Fontolan, 1997).

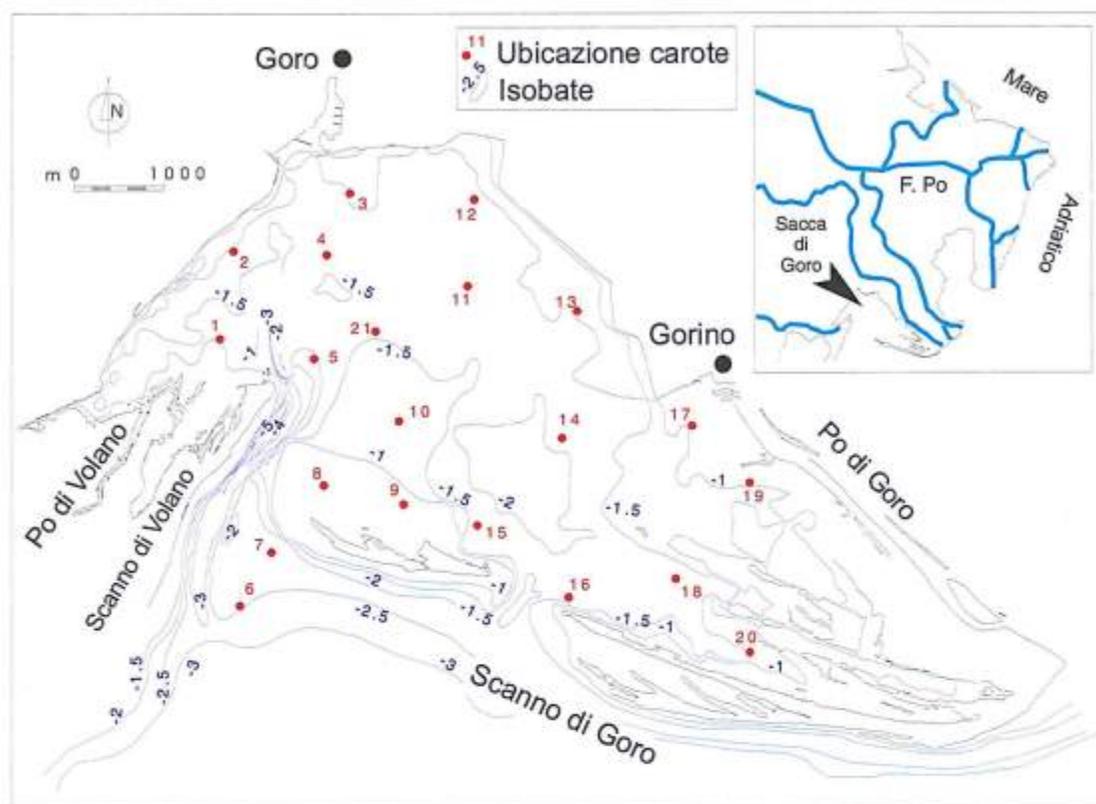


Figura 1 - Ubicazione dei punti di prelievo delle carote.

Per la determinazione del contenuto di alcuni elementi maggiori (Al, Fe, Mn, Ti) ed in tracce (P, Li, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg), i campioni (131) prima liofilizzati (*freeze-drying*) e macinati ( $< 420 \mu\text{m}$ ), poi solubilizzati in *teflon bomb* (aliquote di 0.200 g), con miscela di *acqua regia* e HF concentrato (Loring e Rantala, 1992), tramite mineralizzatore a microonde (Milestone MLS 1200), sono stati sottoposti ad analisi spettrofotometrica. Le determinazioni analitiche di gran parte degli elementi sono state eseguite in fiamma (AAS) mediante spettrofotometro Perkin Elmer 2380. Per quanto riguarda gli elementi Cd e Pb, si è utilizzato, viste le basse concentrazioni, uno spettrofotometro Perkin Elmer 5100, dotato di fornello a grafite HGA-600. Il fosforo totale (P) è stato determinato per via spettrofotometrica nel visibile (Perkin Elmer Lambda Bio 20), previa digestione a caldo con miscela di  $\text{HNO}_3$  e  $\text{HClO}_4$ , seguendo le procedure riportate in IRSA-CNR (1985).

Nella determinazione di Hg totale si è seguita la procedura standard dei vapori freddi (Mercury Hydride System), applicata alla spettrofotometria di assorbimento atomico (Perkin Elmer AAAnalyst 100), previa dissoluzione a caldo in miscela solfo-nitrica come suggerito in IRSA-CNR (1985). In quella di C organico e di N totale, un'aliquota del campione liofilizzato è stata acidificata in capsule d'argento con HCl, in concentrazioni progressivamente crescenti e con aggiunte multiple, fino a completa dissoluzione dei carbonati (Hedges e Stern, 1984; Van Iperen e Helder, 1985). L'analisi strumentale è stata effettuata successivamente con un CHN Elemental Analyzer Perkin Elmer 2400. Infine, la determinazione degli olii minerali è stata eseguita per via ponderale previa estrazione con freon, distillazione ed essiccazione (IRSA-CNR, 1985).

## Risultati

Nel loro complesso i sedimenti delle carote presentano una marcata variabilità nei tenori degli elementi maggiori ed in tracce considerati. In tabella 1 vengono riportati i valori di concentrazione ri-

scontrati nei livelli superficiali delle 21 carote mentre nella tabella 2 sono evidenziati i tenori massimi, minimi e medi determinati considerando i campioni nella loro totalità. Nella tabella 3 è riportato un quadro riassuntivo dei dati di letteratura riguardanti l'area di Goro e di altri ambienti lagunari dell'Adriatico settentrionale.

Relativamente alla Sacca di Goro, Fagioli et al. (1991; 1994) avevano riscontrato, nei sedimenti argillosi e limosi dei settori interni della laguna, tenori elevati di Al e Fe in quanto costituenti principali della struttura dei minerali di origine detritica, dei minerali argillosi e degli ossidi idrati di ferro e manganese associati alle componenti più fini del sedimento (Loring, 1991). Globalmente anche i tenori dei metalli in tracce (Mn, Cr, Cu, Zn, Pb e Cd) rientrano nello stesso ordine di grandezza dei dati già noti per l'area ottenuti da Fagioli et al. (1991 e 1994) con una metodologia di analisi comparabile a quella utilizzata nel presente lavoro, mentre possono discostarsi, anche sensibilmente, dai risultati riportati da Guerzoni et al. (1984) forse per l'utilizzo dell'estrazione parziale (dissoluzione con HNO<sub>3</sub>). Solo il nichel si presenta in concentrazioni più elevate di 0.5 volte rispetto ai dati di Fagioli et al. (1991, 1994) e almeno 2.5 volte superiori rispetto a quelli di Guerzoni et al. (1984). I tenori di mercurio riscontrati in questo studio sono invece dello stesso ordine di grandezza di quelli riportati da Guerzoni et al. (1984), ma più elevati di circa il 30 % rispetto a quanto osservato da Fagioli et al. (1991, 1994). Sempre al confronto con quanto riportato da questi ultimi Autori, per quanto concerne le concentrazioni di azoto totale, carbonio organico e fosforo totale, i valori riscontrati appaiono dello stesso ordine di grandezza per il primo elemento e mediamente dimezzati per gli altri due.

Le concentrazioni di olii minerali rinvenute sono decisamente trascurabili per una valutazione del grado di alterazione dei sedimenti per cause antropiche, risultando tra 3 e 4 ordini di grandezza inferiori a quanto recentemente riscontrato in aree portuali altamente contaminate (Furlan et al., 1999).

Per ciascun parametro analizzato si è deciso di procedere, dapprima limitatamente alla porzione superficiale delle carote, utilizzando una procedura di calcolo che prevede la suddivisione della sacca in settori delimitati da una griglia di zonazione (Fig. 2). Successivamente, sia la variabilità verticale sia i profili di concentrazione sono stati indagati in dettaglio per le due carote di taratura (G18 e G21), grazie alle quali è stato possibile determinare delle funzioni regionali di background naturale, indispensabili per una corretta definizione qualitativa dei sedimenti.

## Discussione

### *Distribuzione areale delle concentrazioni delle variabili geochimiche*

Le distribuzioni delle concentrazioni superficiali di Al, Fe, Mn, Li, Cu, Pb, Cd, Zn, Hg, Corg e Ntot, ottenute con la procedura precedentemente descritta, sono abbastanza simili tra di loro e presentano i valori più elevati nelle zone della sacca dove predominano i sedimenti più fini (Figg. 3 e 4). Per Zn, Cd e Pb (Fig. 3), in particolare, i tenori maggiori sono ubicati in corrispondenza delle carote G11 e G14 (Fig. 1), mentre per Hg (Fig. 4) sono le carote G11 e G13 che evidenziano le concentrazioni più elevate (> 0.40 ppm).

Nel caso del rame (Fig. 3), valori superiori a 75 ppm sono stati riscontrati nella parte centro-orientale (carota G14) e settentrionale della Sacca (carota G12); le minori concentrazioni (< 25 ppm) sono state riscontrate nelle aree delle bocche lagunari.

I tenori più bassi di titanio (< 0.35 ppm) caratterizzano tutta la zona occidentale e sud-orientale della sacca (Fig. 3), mentre nella zona centrale si concentrano quelli più elevati. Infine il fosforo totale è maggiormente concentrato (> 450 ppm) in corrispondenza del settore centrale e di quello più orientale (Fig. 4).

Considerando le griglie di distribuzione areale per il nichel ed il cromo (Fig. 4), si può notare come l'andamento sia più irregolare rispetto agli altri elementi. Tuttavia vale la pena osservare come, nel caso del Ni, i valori massimi siano localizzati nel settore settentrionale della sacca e nelle vicinanze

della G15, mentre il Cr presenta le concentrazioni più elevate nelle zone maggiormente sabbiose e nella zona settentrionale.

Tabella 1 - Tenori delle variabili geochimiche dei livelli sedimentari superficiali (0-20 cm) della Sacca di Goro.

SIGLA	Fe %	Mn %	Al %	Ti %	Ni ppm	Cr ppm	Li ppm	Cu ppm
G1	3.39	0.068	5.44	0.360	112	125	39	37
G2	3.13	0.075	4.89	0.362	128	139	47	49
G3	4.20	0.091	6.59	0.431	137	187	57	67
G4	3.82	0.077	6.20	0.421	137	182	49	51
G5	2.85	0.075	5.31	0.297	113	136	34	20
G6	2.70	0.072	4.78	0.328	130	181	29	11
G7	2.95	0.078	5.21	0.421	100	185	30	10
G8	2.75	0.069	5.00	0.290	117	158	32	10
G9	3.36	0.065	5.56	0.422	137	190	42	32
G10	3.42	0.074	5.69	0.426	127	156	43	31
G11	4.07	0.081	6.50	0.481	137	187	58	47
G12	4.15	0.078	6.68	0.431	152	165	57	109
G13	4.24	0.102	6.64	0.450	150	158	59	39
G14	4.16	0.085	6.77	0.506	125	176	59	96
G15	3.20	0.063	5.35	0.409	140	160	41	35
G16	2.80	0.071	4.80	0.287	130	163	30	16
G17	3.58	0.078	6.13	0.464	138	171	47	36
G18	4.16	0.085	6.77	0.506	125	176	59	96
G19	3.04	0.066	5.13	0.380	112	178	34	34
G20	3.33	0.071	5.68	0.388	137	160	41	41
G21	3.67	0.072	6.24	0.458	118	176	49	53
SIGLA	Zn ppm	Pb ppm	Cd ppm	Hg ppm	Corg %	Ntot %	Ptot ppm	Oli min. ppm
G1	134	7.25	0.42	0.09	1.14	0.15	857	4.82
G2	190	14.73	0.85	0.24	1.21	0.40	235	5.58
G3	238	19.43	1.03	0.51	1.25	0.27	265	0.85
G4	196	12.53	0.66	0.24	1.05	0.31	351	7.19
G5	110	5.53	0.46	0.10	0.88	0.24	374	1.12
G6	78	5.00	0.45	0.04	0.15	0.07	401	0.48
G7	77	5.18	0.32	0.04	0.16	0.07	421	1.21
G8	89	5.14	0.27	0.05	0.20	0.07	305	4.85
G9	160	12.13	0.62	0.18	0.75	0.11	382	1.69
G10	152	10.77	0.45	0.17	0.87	0.18	329	0.82
G11	252	28.75	1.34	0.54	1.28	0.18	462	0.77
G12	207	22.64	0.86	0.40	1.80	0.25	294	1.34
G13	202	20.19	0.58	0.54	1.37	0.19	149	14.73
G14	269	35.95	2.11	0.46	1.08	0.14	230	1.88
G15	142	13.89	0.83	0.22	0.74	0.15	409	1.00
G16	85	6.00	0.19	0.03	0.12	0.07	334	0.19
G17	148	14.49	0.94	0.18	0.77	0.13	484	1.25
G18	269	35.95	1.40	0.46	1.08	0.14	230	1.88
G19	135	12.31	0.91	0.23	0.35	0.09	363	0.34
G20	126	12.24	0.46	0.20	0.78	0.10	381	1.26
G21	169	11.31	0.46	0.29	1.11	0.17	379	2.48

Tabella 2 - Tenori medi, minimi e massimi delle variabili geochimiche nei sedimenti della Sacca di Goro.

	Fe %	Mn %	Al %	Ti %	Ni ppm	Cr ppm	Li ppm	Cu ppm
<b>n</b>	131	131	131	131	131	131	131	131
<b>Max.</b>	4.47	0.116	7.57	0.712	192	234	63	109
<b>Min.</b>	2.11	0.062	4.74	0.228	28	115	23	3
<b>Medio</b>	3.54	0.077	6.02	0.437	137	169	47	33
<b>St.dv.</b>	0.44	0.009	0.62	0.078	20	18	9	15

	Zn ppm	Pb ppm	Cd ppm	Hg ppm	Corg %	Ntot %	Ptot ppm	Oli min. ppm
<b>n</b>	131	80	80	80	80	80	80	60
<b>Max.</b>	323	35.95	2.11	0.54	1.8	0.4	500	14.73
<b>Min.</b>	49	2.75	0.09	0.02	0.09	0.03	111	0.1
<b>Medio</b>	119	9.17	0.45	0.15	0.61	0.12	312	1.93
<b>St.dv.</b>	44	5.57	0.33	0.13	0.38	0.08	93.4	2.78

Tabella 3 - Tenori medi, minimi e massimi degli elementi maggiori ed in tracce nei sedimenti della Sacca di Goro e di altre aree costiere e lagunari dell'Adriatico settentrionale ricavati dalla letteratura. Viene riportato il metodo di dissoluzione ove diverso da quello utilizzato nel presente lavoro.

	1 (a)	1 (b)	2	3	4	5 (a)	5 (b)	6 (b)	6 (c)	7 (a)	7 (b)	7 (c)	7 (d)
<b>Fe</b> (%)	2.35	3.65	1.2 0.33-1.89	-	-	0.06 0.04-0.09	0.07 0.06-0.09	-	-	21.3	14.1	14.2	15.6
<b>Al</b> (%)	-	-	4.42 3.30-7.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Cr</b> (ppm)	150	179	202 147-257	56 47-85	57	43.7 28.0-62.0	50.5 32.0-56.0	57.32 6.8-151.60	28.32 18.40-42.7	16.3	12.3	14.6	11.4
<b>Cd</b> (ppm)	0.14	0.42	0.67 0.49-0.81	1.4 1.2-1.6	1.2	-	-	3.19 2.26-4.74	2.15 1.32-3.02	11.95	1.000	0.877	1.533
<b>Cu</b> (ppm)	16.4	49.4	34.0 9.2-48.6	58 46-65	58	92.3 56.0-183.0	97.6 76.0-123.0	22.84 5.3-46.57	21.7 13.8-30.0	135.6	13.9	14.4	18.7
<b>Mn</b> (ppm)	696	910	752 594-899	474 452-506	484	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ni</b> (ppm)	79.2	98.6	105 86.5-125	53 46-60	56	-	-	-	-	24.8	20.4	20.2	22.2
<b>Pb</b> (ppm)	8.5	25.1	16.8 9.2-21.6	72 59-81	59	77.2 48.0-132.0	76.9 60.0-130.0	39.79 31.47-56.05	41.75 31.10-74.10	99.2	25.9	24.4	43.3
<b>Ti</b> (ppm)	-	-	-	50 43-61	49	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Zn</b> (ppm)	110	214	171 149-209	187 156-210	189	45.0 36.0-60.0	42.9 36.0-52.0	114.45 29.69-334.79	96.64 48.90-163.80	1655.1	45.7	64.7	49.5
<b>Hg</b> (ppm)	0.04	0.15	0.099 0.064-0.164	0.48 0.32-0.57	0.47	2.79 1.01-5.85	5.51 3.42-9.12	5.09 0.27-16.58	6.38 1.05-13.73	2.130	0.077	0.3	0.34

1 - Sacca di Goro (Fagioli *et al.*, 1991) (a) Stazione 7, (b) Stazioni 3, 4 e 8; 2 - Sacca di Goro (Fagioli *et al.*, 1994) 3 - Delta del Po (Guerzoni *et al.*, 1984); dissoluzione con HNO<sub>3</sub>; 4 - Delta del Po (Frasconi *et al.*, 1984); dissoluzione con HNO<sub>3</sub>; 5 - Laguna di Grado (a) e Marano (b) (Marocco, 1995); 6 - Laguna di Grado e Marano (Brambati, 1997): bennate (b) e carote (c); 7 - Laguna di Venezia (Basu e Molinaroli, 1994) (a) Porto Marghera, (b) Sud, (c) Centro, (d) Nord; dissoluzione con HNO<sub>3</sub>.

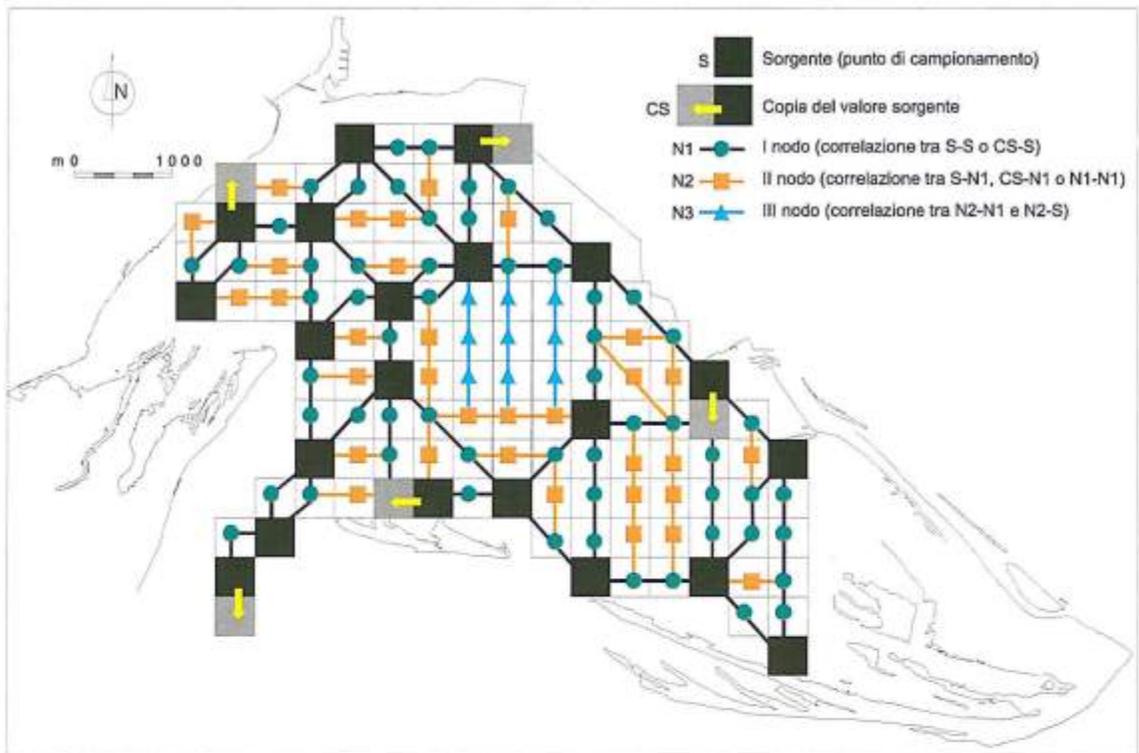


Figura 2 - Schema della griglia di suddivisione della Sacca di Goro, utilizzata per il calcolo delle distribuzioni areali dei singoli parametri. La sacca è rappresentata da 126 celle quadrate di 400 m di lato, di cui 21 (caselle nere) rappresentano le celle incentrate sui punti di campionamento. L'algoritmo di calcolo è dato da una serie di interpolazioni lineari, ponderate sulla distanza (assunta costante tra celle attigue) a partire dal collegamento tra i nodi sorgente (S) più vicini tra loro. Ad alcune celle (CS) è stato attribuito il valore sorgente, per l'estrema vicinanza del punto di campionamento. La correlazione sulla linea S-S o S-CS genera dei nodi (N1) che divengono sorgente per ulteriori correlazioni lungo le linee N1-N1, N1-S e N1-CS. La copertura è stata garantita fino al III ordine di nodi (N3) generati dall'interpolazione tra N2-N1 e N2-S nell'area centrale della sacca, a minor copertura di dati.

Per quanto riguarda la distribuzione degli olii minerali, i tenori più elevati in superficie si rinvennero in corrispondenza delle carote G1, G2, G4, G8 e G13 (Fig. 1), cioè nei settori settentrionale, occidentale ed orientale della sacca e nell'area della bocca principale (Fig. 4).

#### Profili verticali delle concentrazioni delle variabili geochimiche nelle carote G18 e G21

In Fig. 5 sono riportate le distribuzioni verticali di tutti gli elementi nelle due carote di taratura. Nella carota G18, le concentrazioni di Fe, Al, Ti, Mn, Li presentano alcuni picchi in profondità, talora piuttosto marcati, correlabili tra loro. Tali brusche variazioni sono dovute a netti cambiamenti tessiturali, legati alla percentuale della frazione siltosa (correlazione positiva, Fig. 6) a testimonianza di un'origine essenzialmente litogenica dei suddetti elementi in questa carota.

Contrariamente all'andamento piuttosto irregolare del nichel, le concentrazioni di Cu, Zn, Cd, Pb e Hg presentano, tendenzialmente, un incremento nella porzione superficiale della carota con alcuni picchi ben definiti, ma non correlabili a variazioni tessiturali. Nel caso del mercurio questo incremento è particolarmente marcato e progressivo dai livelli basali a quelli più superficiali.

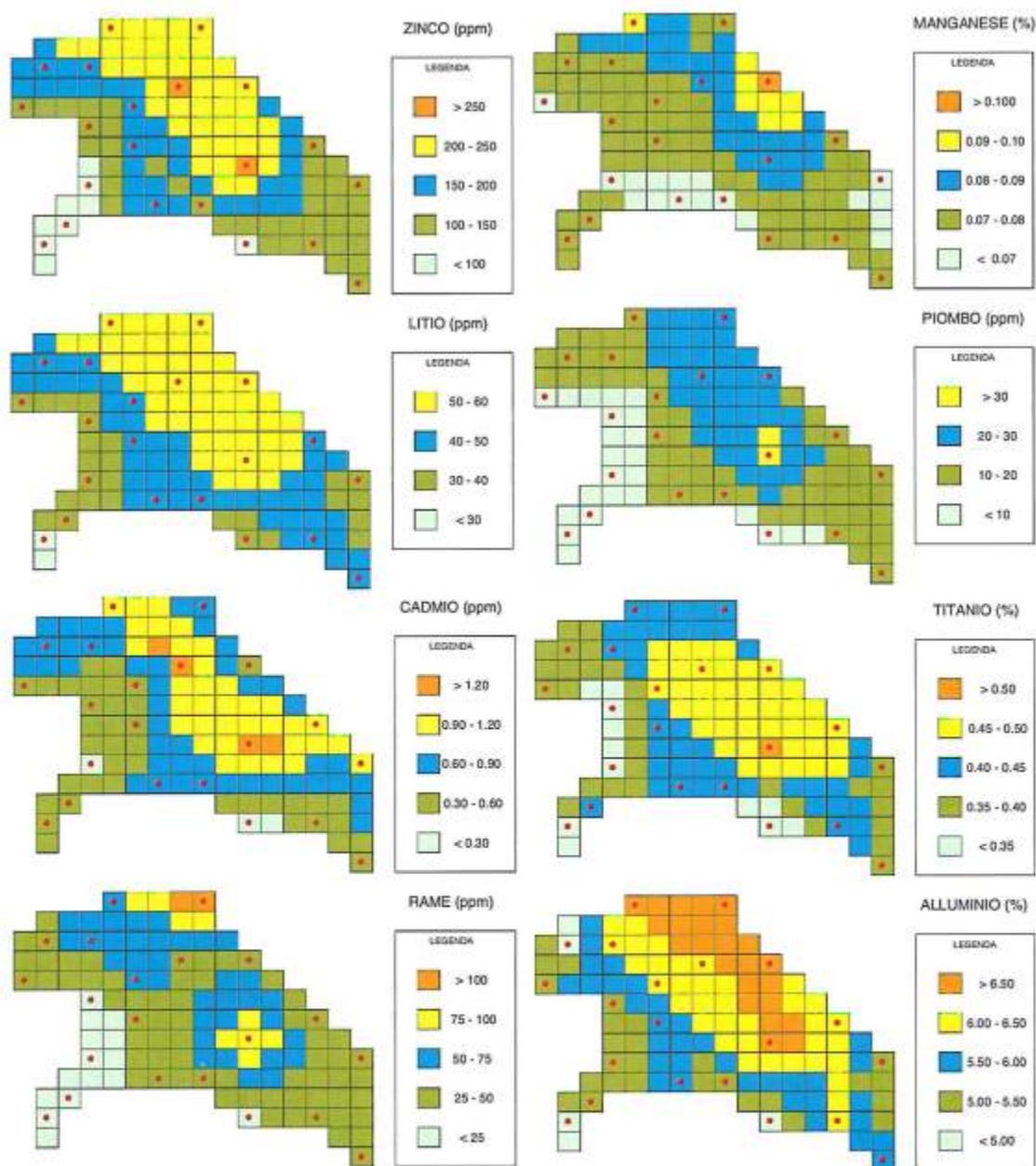


Figura 3 - Distribuzione areale delle concentrazioni delle variabili geochemiche investigate.

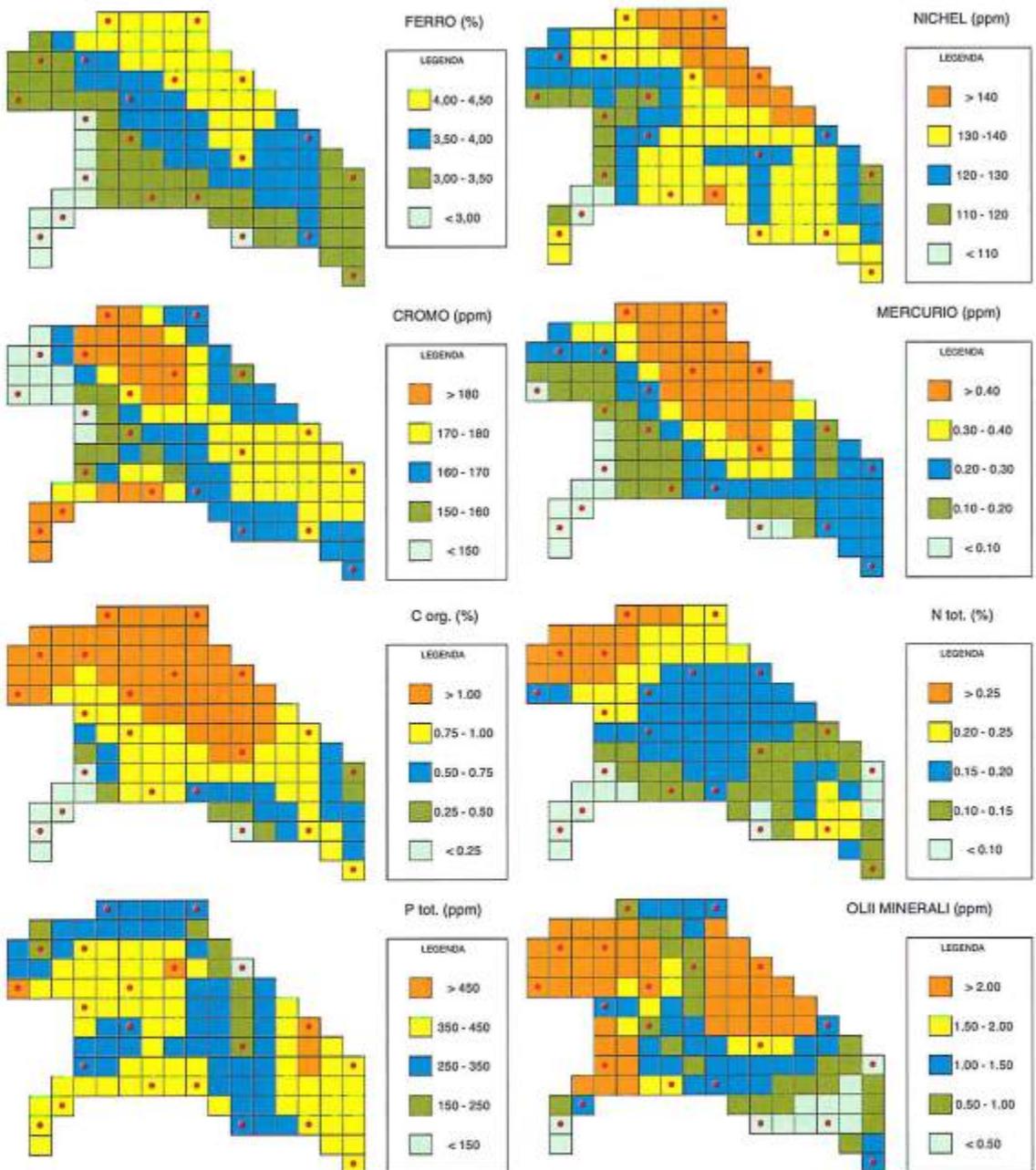


Figura 4 - Distribuzione areale delle concentrazioni delle variabili geochimiche investigate.

Sia il carbonio organico che l'azoto totale, seppur con modalità diverse, decrescono in profondità, in particolare al di sotto del metro, mentre il fosforo totale mostra un anomalo e brusco incremento nel livello basale della carota.

Nella carota G21 le concentrazioni di Fe, Al, Li, Ti, Cr e Mn hanno un andamento costante, fatta eccezione, come già visto per la carota G18, per qualche picco isolato. Le concentrazioni di nichel e rame seguono un andamento molto irregolare: la concentrazione del primo aumenta con la profondità mentre il secondo presenta un'opposta tendenza.

Zn, Cd, Pb e Hg, in particolare, mostrano un andamento molto regolare nella porzione basale ed un chiaro aumento della concentrazione nei livelli sedimentari della porzione sommitale della carota. Per il carbonio organico, l'azoto ed il fosforo totali vale quanto riportato precedentemente per la carota G18, anche se il decremento nel primo metro dei tenori di azoto è meno marcato.

### ***Funzioni regionali di normalizzazione e fattori di arricchimento***

Le funzioni regionali di base rappresentano delle relazioni matematiche che permettono di ricavare, per una determinata area, la concentrazione naturale dei metalli in tracce presenti nei sedimenti, cioè la soglia oltre la quale l'esistenza di un elemento non è più imputabile ai soli processi naturali ma anche ad apporti di materiali derivanti dall'attività antropica (Loring, 1990; Din 1992; Colizza et al. 1996). Il semplice confronto su base numerica dei valori di concentrazione può, infatti, portare a grossolani errori di valutazione dello stato di alterazione dei sedimenti (Covelli e Fontolan, 1997).

Nel calcolo di tali funzioni, è fondamentale individuare un elemento normalizzante (*grain-proxy*), cioè l'elemento la cui presenza sia associata alla frazione più fine dei sedimenti perché in essa si concentra la totalità dei metalli in tracce di provenienza sia naturale che antropica (De Groot et al., 1976; Donazzolo et al., 1981a, 1981b; Brambati e Marocco, 1984; Loring, 1991; Loring e Rantala, 1992). L'altro requisito è disporre di un numero sufficientemente elevato di campioni che non siano stati interessati da alterazioni antropogeniche. Per la Sacca di Goro, tali funzioni sono state calcolate in base ai tenori rilevati nei sedimenti dei livelli profondi delle carote, che si suppone si siano accumulati in epoca preindustriale.

Nel caso in esame, tra i possibili normalizzanti il ferro, l'alluminio ed il litio presentano elevati coefficienti di correlazione con la matrice fine del sedimento (*pelite*), pari a  $r = 0.853$  per Fe,  $r = 0.850$  per Al e  $r = 0.917$  per Li ( $p < 0.001$ ). Sebbene quest'ultimo risulti l'elemento meglio correlato, si è preferito utilizzare il Fe, in quanto più diffusamente impiegato per tale procedura (Tefry e Presley, 1976; Rule, 1986; Sinex e Wright, 1988). La scelta, tuttavia, non sembra poter inficiare l'elaborazione perché i tre elementi risultano correlati tra loro in maniera altamente significativa ( $r > 0.900$ ) a riprova della loro comune provenienza litogenica.

Non disponendo di datazioni radiometriche l'individuazione del limite tra sedimenti pre e postindustriali risulta assai complessa, anche per la mancanza di precisi tassi di sedimentazione (Simeoni et al., 1999; Tesolin, 1999), per l'elevata dinamicità dell'ambiente e della subsidenza (Simeoni et al., 1998). Si è deciso, quindi, di operare utilizzando la significativa variabilità verticale del rapporto Zn/Fe nelle carote G18 e G21 (Fig. 7a) come possibile indice dell'alterazione antropica su scala temporale. Si può chiaramente notare il progressivo incremento del rapporto nei primi 53 cm della G18 e nei primi 97 cm della G21. A tal proposito, inserendo in un diagramma binario Zn-Fe tutti i campioni disponibili (Fig. 7b), appaiono due relazioni lineari. Il ramo superiore è costituito da tutti i campioni che si sospettano alterati: tutti i livelli superficiali delle carote e quelli appartenenti ai primi 53 cm della G18 e ai primi 97 cm della G21. Lo spessore di materiale alterato varia tra carota e carota in quanto dipendente dalla variabilità locale dei tassi di sedimentazione e/o subsidenza. La definizione della funzione regionale elemento-normalizzante avviene eliminando i campioni arricchiti, corrispondenti in questo caso al ramo superiore della distribuzione, dal diagramma binario (Loring, 1991). A riprova della validità dell'approccio, il coefficiente di correlazione tra Fe e Zn risulta migliorato, passando da  $r = 0.412$  a  $r = 0.521$  ( $p < 0.001$ ).

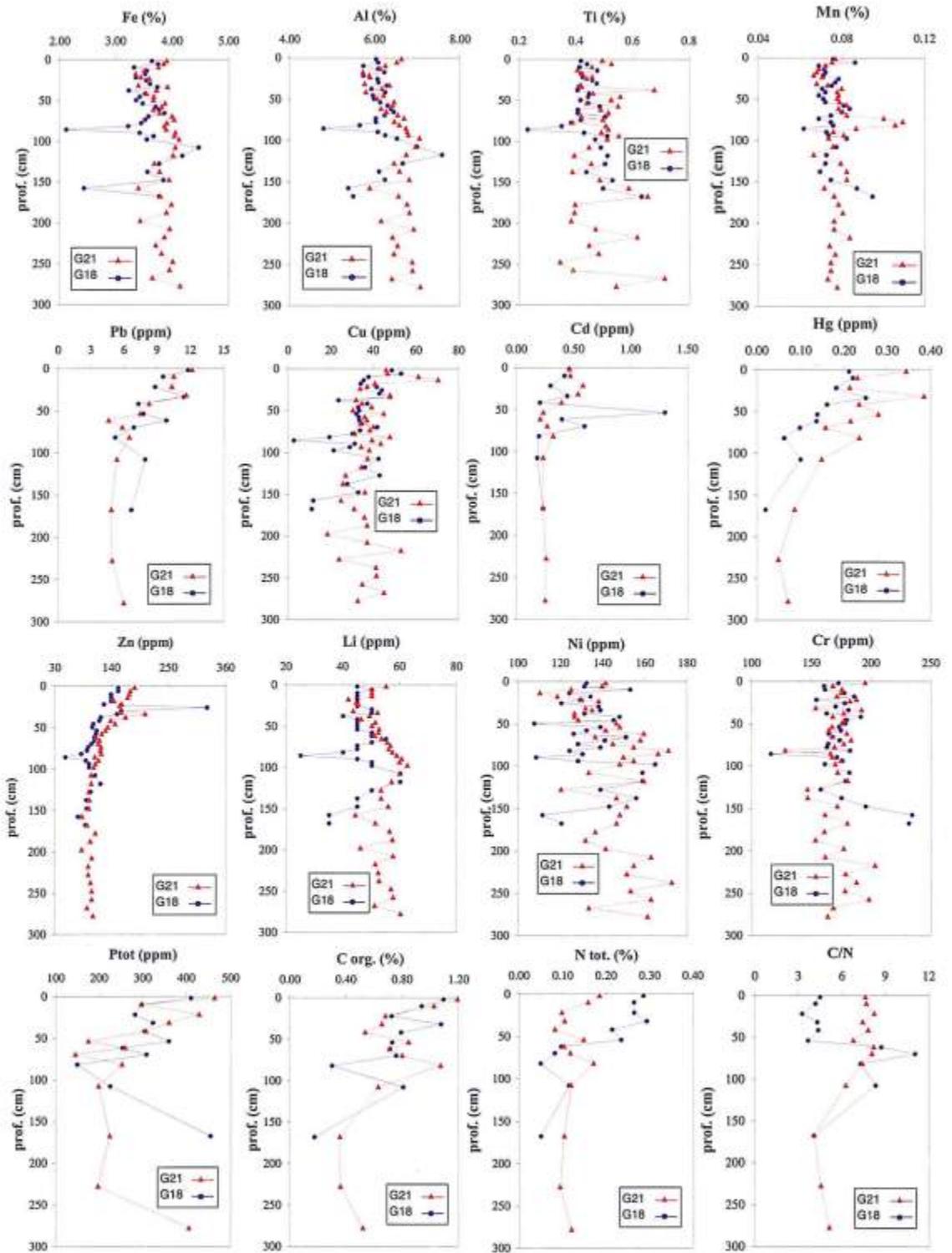


Figura 5 - Distribuzione verticale degli elementi maggiori ed in tracce nelle "carote di taratura" G18 (linea blu) e G21 (linea rossa).

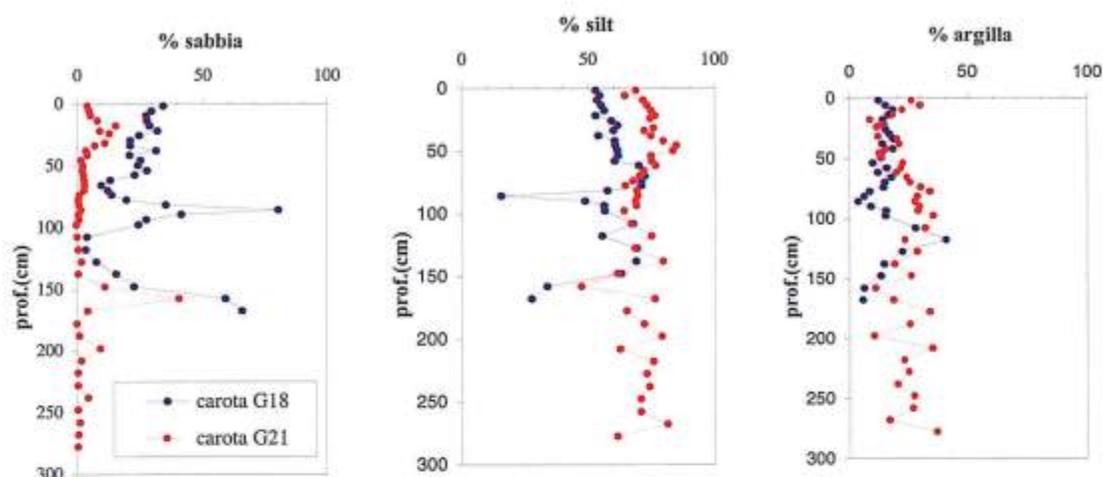


Figura 6 - Distribuzione verticale dei caratteri granulometrici delle carote di "taratura" G18 (linea blu) e G21 (linea rossa).

Tab. 4 - Funzioni di base regionali per ciascun elemento con i rispettivi parametri e livelli di significatività:  
 a = coefficiente angolare della retta;  $\sigma_a$  = deviazione standard del coefficiente angolare;  
 b = intercetta;  $\sigma_b$  = deviazione standard dell'intercetta;  
 n = numero di campioni considerati; r = coefficiente di correlazione;  
 p = significatività.

Elemento	a ( $\pm\sigma_a$ ) Fe + b ( $\pm\sigma_b$ )	r	n	p
Mn =	0.007 ( $\pm 0.001$ ) Fe + 0.050 ( $\pm 0.003$ )	0.665	68	p<0.001
Al =	1.408 ( $\pm 0.058$ ) Fe + 1.075 ( $\pm 0.206$ )	0.950	66	p<0.001
Ti =	0.110 ( $\pm 0.010$ ) Fe + 0.030 ( $\pm 0.035$ )	0.811	66	p<0.001
Ni =	18.430 ( $\pm 2.799$ ) Fe + 74.996 ( $\pm 9.911$ )	0.639	65	p<0.001
Li =	19.020 ( $\pm 0.671$ ) Fe -20.779 ( $\pm 2.383$ )	0.960	71	p<0.001
Cu =	18.535 ( $\pm 1.300$ ) Fe -36.843 ( $\pm 4.590$ )	0.862	72	p<0.001
Zn =	21.641 ( $\pm 1.730$ ) Fe + 16.147 ( $\pm 6.110$ )	0.842	66	p<0.001
Cd =	0.0897 ( $\pm 0.031$ ) Fe -0.0565 ( $\pm 0.106$ )	0.457	34	p<0.007
Pb =	1.4627 ( $\pm 0.681$ ) Fe + 1.5434 ( $\pm 2.373$ )	0.321	42	p<0.038
Cr =	10.795 ( $\pm 3.434$ ) Fe + 129.48 ( $\pm 12.288$ )	0.366	66	p<0.003
Hg =	0.0459 ( $\pm 0.012$ ) Fe + 0.0459 ( $\pm 0.041$ )	0.539	37	p<0.001

Applicando la stessa procedura agli altri metalli in tracce, le relazioni binarie con il ferro vengono ottimizzate fino ad ottenere le funzioni di base a carattere regionale (funzioni lineari del tipo: Elemento = a·Fe + b) come riportato in Tabella 4.

Le variazioni nella concentrazione del metallo tra i valori calcolati teoricamente e determinati per via analitica sono ragionevolmente ascrivibili alla presenza di uno o più fattori di alterazione.

Si può quindi ipotizzare per diverse tipologie di sedimento, un fattore di arricchimento (EF) del metallo dato dal semplice rapporto tra la concentrazione (n) reale e quella teorica ottenuta dalle suddette funzioni (Covelli e Fontolan, 1996):

$$EF = n_{reale} / n_{teorica} \quad [1]$$

L'entità degli arricchimenti individuati per i sedimenti superficiali della Sacca di Goro risulta molto contenuta e limitata a singoli campioni per gli elementi essenzialmente litogenici (Al, Li, Mn, Cr, Ti, Ni). Al contrario, le quote sommitali (0-20 cm) di tutte le carote, ad eccezione di quelle sabbiose più esterne alla sacca (G6, G7, G8, G16) presentano, in misura diversa, valori di EF (Fig. 8) significativamente superiori ad 1. Gli EF dei metalli pesanti di sospetta provenienza antropica mostrano valori massimi significativi in quest'ordine di grandezza: > 5 per Hg, > 4 per Cd e Pb e > 2 per Zn e Cu. Nei diagrammi di variazione degli EF con la profondità nelle due carote G18 e G21 (Fig. 9) risulta evidente il limitato scarto di valori per Mn, Al, Ti, Cr, Ni e Li, malgrado alcuni picchi positivi di Mn (EF < 1.5), alla quota 72-86 cm della carota G21 e alla base della carota G18, e di Ti (con EF di poco superiore a 1.5 o entro 1.5) prevalentemente nei livelli basali di G18 e in alcuni livelli sparsi di G21. Questa caratteristica si mantiene anche per le restanti carote.

Gli arricchimenti relativi a Zn, Cu, Hg, Pb e Cd confermano, invece, un preferenziale incremento dei valori nei livelli superficiali: l'EF (Zn) risulta infatti > 1 a partire dalla quota 70 cm ca. della carota G18 e dalla quota 94 cm ca. di G21; tuttavia, quasi tutti gli arricchimenti si mantengono al di sotto del valore 2. Lo stesso vale per EF (Cu), seppur con una maggior fluttuazione dei valori. Il mercurio presenta i trend di arricchimento più evidenti dalla base alla sommità delle carote: l'EF è superiore a 1 a partire da 107 e 70 cm circa, rispettivamente nelle carote G21 e G18, con picchi massimi fino a 5.29 (G21) e 3.19 (G18) nei livelli subsuperficiali (31 e 9 cm di profondità). Il sedimento appare debolmente arricchito in Pb (EF < 2) nei primi 50 cm in entrambe le carote (41 cm per G21 e 61 cm per G18).

Per lo stesso spessore, il Cd presenta tenori di arricchimento massimi di poco superiori a 2 in entrambe le carote, con un picco pari a circa 5 volte il valore del background nella carota G18 (53 cm).

### Zonazione geochimica

Una prima valutazione qualitativa dello «stato di salute» dei fondali della Sacca di Goro può essere fatta analizzando la distribuzione di superficie dei valori di EF, limitatamente agli elementi più significativi. L'arricchimento di zinco, piombo e mercurio (Fig. 8) si sviluppa lungo una direttrice N-SE, con massimi nel settore centro settentrionale della sacca. Anche per il rame ed il cadmio le maggiori variazioni si riscontrano nella zona centrale e settentrionale della laguna.

Al fine di poter ridurre molte variabili descrittive a pochi e semplici indicatori numerici, sulla matrice dei dati geochimici è stata applicata, l'analisi fattoriale in modo R (Principal Component – rotazione Varimax). L'elaborazione ha consentito l'estrazione di 4 Fattori per una varianza complessiva pari a 79.6 % così distribuita (Tab. 5): 50.7 % F1, 15.7 % F2, 7.3% F3 e 5.9% F4. Negli ultimi due confluiscono il fosforo totale, nichel ed il cromo che però presentano andamenti irregolari e poco significativi per l'interpretazione dei risultati.

Il fattore 1 riunisce Zn, Pb, Hg, Cd, Cu, Corg, Ntot, Clay 2 (% argilla < 2 µm) e Clay 4 (< 4 µm). Questo fattore raggruppa i metalli in tracce che risultano di parziale provenienza antropica e le componenti a cui sono preferenzialmente associati: sostanza organica e frazione argillosa. Il fattore 2 raggruppa invece Fe, Ti, Al, Li, Mn e pelite, a conferma dell'associazione di questi elementi con la frazione fangosa nei sedimenti.

Utilizzando la matrice di correlazione di tutti i dati geochimici *listwise* si è quindi eseguita l'analisi fattoriale in modo Q (Principal Component – rotazione Varimax). Tale procedura d'analisi ha estratto 2 fattori, per una varianza complessiva pari a 99.0% (Fattore 1=95.8%, Fattore 2=3.2%).

In questo caso si sono volutamente esclusi dall'analisi alcuni parametri quali il fosforo totale, per la sua correlazione negativa con tutti gli altri parametri, il clay 4 (< 4 µm) e la pelite.

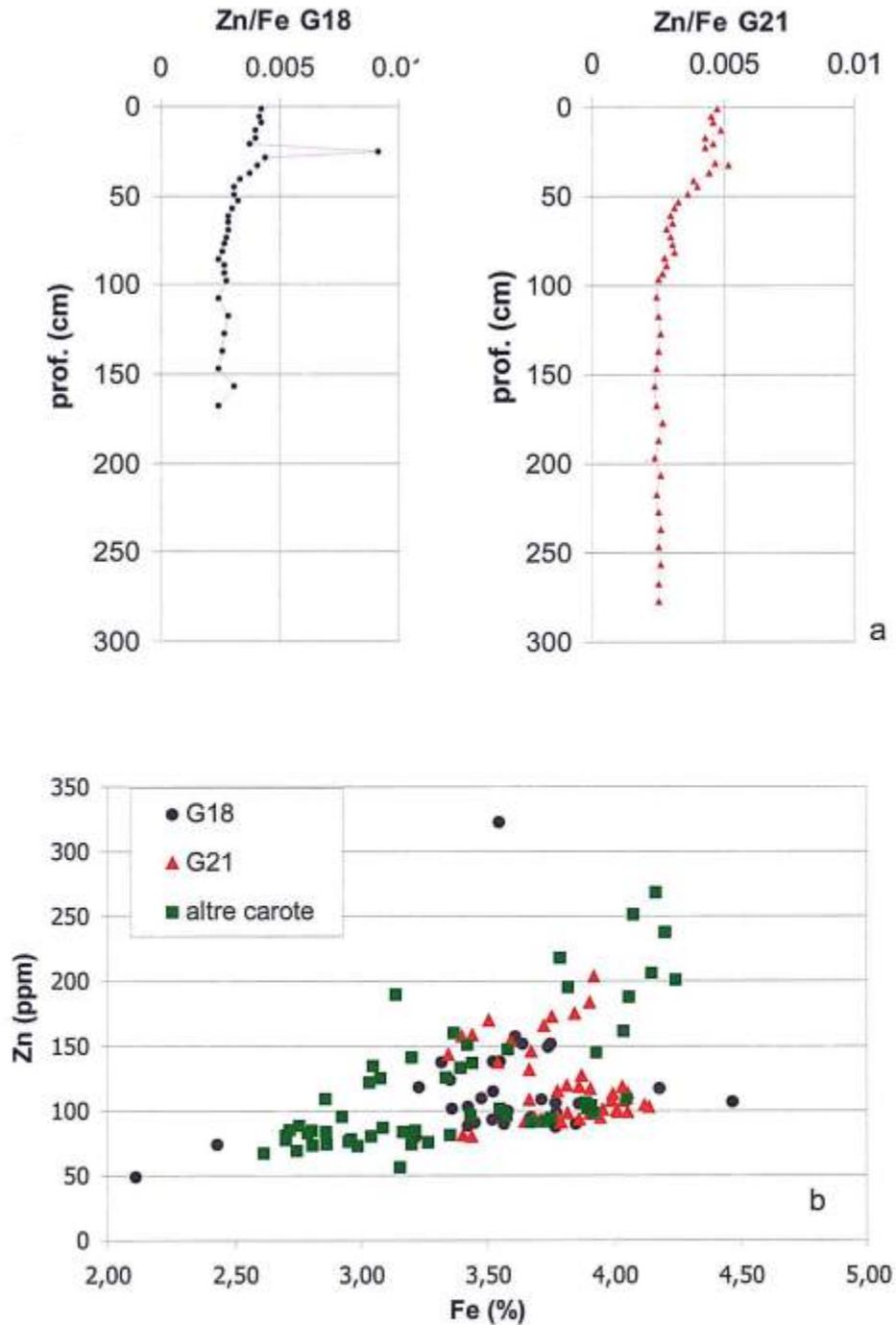


Figura 7 - Andamento verticale del rapporto Zn/Fe nelle carote G18 e G21 (a) e relazione tra Zn e Fe in tutti i campioni analizzati (b).

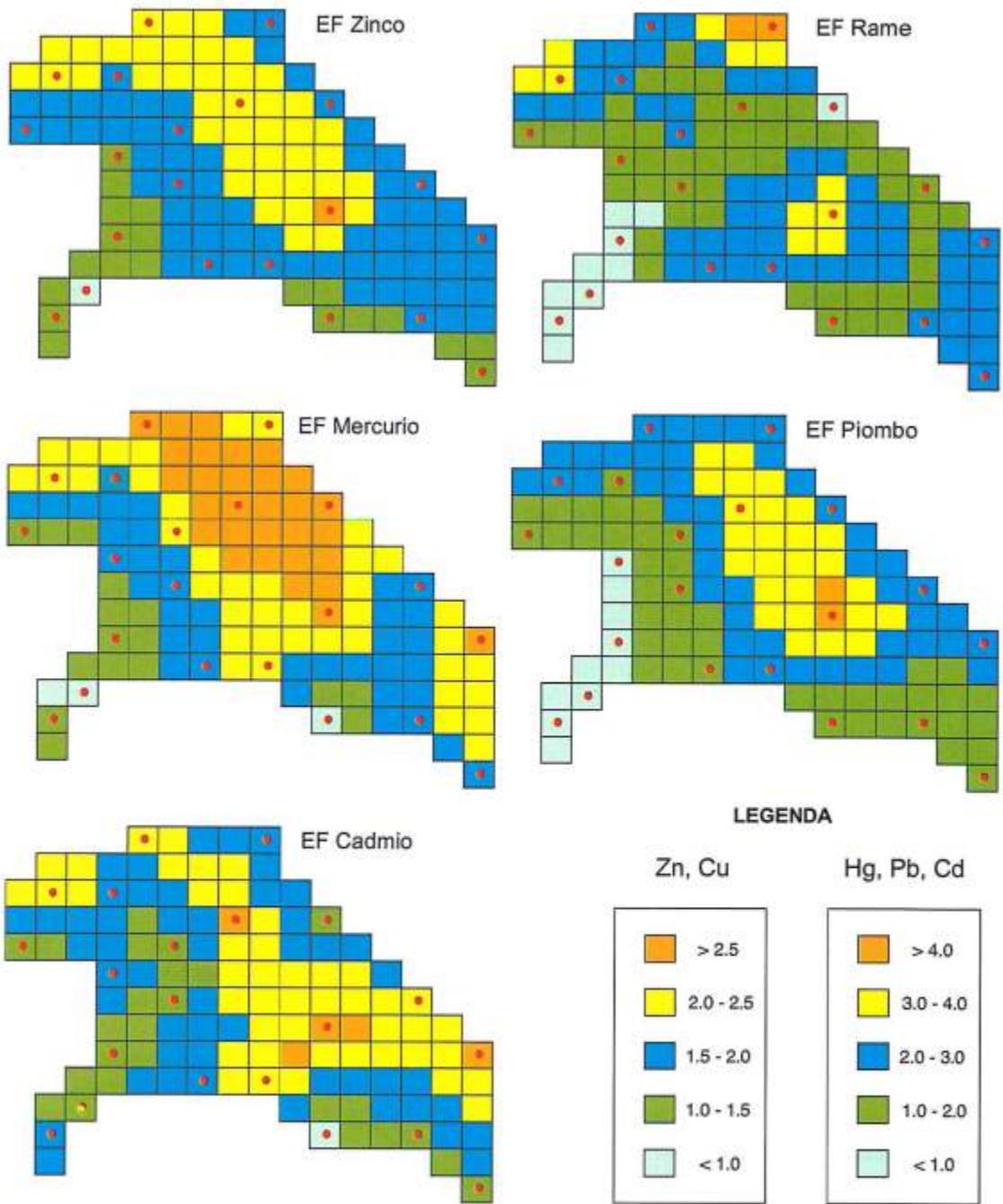


Figura 8 - Distribuzione areale dei fattori di arricchimento (EF) dei metalli in tracce nei sedimenti superficiali (0-20 cm).

Si è perciò considerato il solo parametro clay 2 (< 2  $\mu\text{m}$ ) come sufficientemente rappresentativo della variabilità tessiturale del sedimento e del ruolo primario che tale frazione svolge nella presenza delle anomalie dei metalli riscontrate nell'area.

Tabella 5 - Risultati dell'analisi fattoriale in modo R.

Eigenvalues	Varianza (%)		Varianza cum.	
9.12469	50.7		50.7	
2.82200	15.7		66.4	
1.31549	7.3		73.7	
1.05944	5.9		79.6	
	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 3	Fattore 4
Zn	0.92355	0.28208	-0.10441	-0.02226
Pb	0.89630	0.05512	0.06856	0.21896
Hg	0.85663	0.28222	-0.04703	-0.02552
Cd	0.85474	0.00805	-0.04843	0.15647
Cu	0.76040	0.43152	0.15686	-0.01750
Corg	0.74786	0.43567	-0.05930	-0.22111
Ntot	0.64646	0.25837	-0.12198	-0.24146
Clay < 2 $\mu\text{m}$	0.64420	0.45939	0.15434	-0.33802
Clay < 4 $\mu\text{m}$	0.62693	0.57518	0.19335	-0.30337
Fe	0.36003	0.87613	0.20050	0.11742
Ti	0.05090	0.82860	-0.10609	0.33943
Al	0.29393	0.82830	0.31171	0.13858
Li	0.42419	0.80670	0.33129	-0.01591
Pelite	0.36440	0.78563	0.30014	-0.04354
Mn	0.13249	0.64589	0.00701	-0.08199
Ptot	0.06255	-0.11540	-0.89962	0.08880
Ni	-0.08680	0.33291	0.66285	0.31734
Cr	0.00897	0.14465	0.07848	0.88254

La distribuzione dei due fattori per le carote in esame è riportata in Figura 10. Si può notare che il Fattore 1 (Fig. 10a) risulta distribuito con alti valori di *factor loading* (FL) in quasi tutti i livelli delle carote, ma con un trend crescente procedendo verso i livelli più profondi; per tale ragione ad esso può essere associata la tipologia geochemica «naturale».

Il Fattore 2 (Fig. 10b) presenta un andamento complementare, con pronunciato trend decrescente di valori verso i livelli basali di quasi tutte le carote, con l'eccezione di quelle sabbiose di piattaforma di spit e di bocca tidale (G6, G7, G8, G16). Ad esso si può quindi associare una tipologia di matrice «contaminata», discriminata da un valore limite di FL pari a 0.6.

Per verificare la gerarchizzazione ottenuta dall'analisi fattoriale sono stati posti a confronto il contenuto della frazione argillosa con il peso del Fattore 2, distinguendo i campioni con FL superiore a 0.6 da quelli con valore inferiore. La relazione estrapolata (Fig. 10c) evidenzia come la funzione basale sia ben discriminata da quella superficiale.

In termini di tenori medi, i due gruppi si distinguono essenzialmente sulla base della sostanza organica (carbonio organico ed azoto totale) e dei metalli pesanti potenzialmente più tossici che sono presenti in concentrazioni più elevate in superficie rispetto al livello basale (Tab. 6): circa il 300% per il mercurio e 100% per il Pb, Cd, Cu e Zn.

L'analisi fattoriale, pur non rappresentando quantitativamente i valori di anomalia, ha permesso di mettere in luce l'alterazione che coinvolge essenzialmente la porzione superficiale dei sedimenti della Sacca di Goro. Poiché tale peculiarità è determinata in gran parte da quegli elementi già rappresentati da valori di EF significativamente superiori a 1 (Hg, Pb, Cd, Zn e Cu), la distribuzione areale di quest'ultima può fornire un primo elemento di zonazione geochimica. La distribuzione areale del peso del Fattore 2 rappresenta dunque una sintesi della distribuzione delle caratteristiche geochimiche della Sacca di Goro, a tale scopo in figura 11 vengono rappresentate griglie di zonazione per i livelli superficiali, intermedi e profondi delle carote indagate. Appare evidente come vi sia una forte diminuzione del peso del Fattore 2 passando dai livelli superficiali a quelli intermedi e basali; le uniche carote che non seguono questo andamento sono quelle più sabbiose (G6 e G7).

Tabella 6 - Valori medi delle variabili geochimiche e tessiturali dei due gruppi di campioni discriminati attraverso l'analisi fattoriale;  $\Delta C\%$  rappresenta la variazione percentuale rispetto alla base.

Variabile	SUPERFICIE		BASE		$\Delta C\%$
	Media	dev.st.	Media	dev.st.	
Fe	3,62	0,38	3,34	0,48	8,4
Mn	0,08	0,01	0,07	0,01	5,4
Al	5,98	0,50	5,69	0,70	5,1
Ti	0,43	0,05	0,41	0,08	3,7
Ni	132,55	22,09	138,82	21,28	-4,5
Cr	164,51	18,08	170,17	17,93	-3,3
Li	47,86	7,34	41,33	10,03	15,8
Cu	43,58	17,81	23,88	10,46	82,5
Zn	159,80	41,13	89,61	13,46	78,3
Pb	12,66	6,67	6,45	2,02	96,1
Cd	0,63	0,37	0,31	0,21	102,0
Hg	0,26	0,12	0,07	0,04	279,8
Ptot	331,94	91,02	296,75	93,31	11,9
Corg	0,92	0,29	0,37	0,24	151,8
Ntot	0,17	0,008	0,07	0,004	128,6
Clay2	19,43	13,22	9,36	7,45	107,7
Clay4	29,71	17,56	15,82	11,80	87,8
Pelite	79,97	21,04	58,37	33,48	37,0

## Conclusioni

Le caratteristiche geochimiche dei sedimenti recenti della Sacca di Goro, nel loro complesso, denunciano una marcata variabilità relativamente ai tenori degli elementi indagati. Tale variabilità, che si nota sia in senso verticale che areale, può essere imputata a tre diversi fattori, talora sovrapposti:

a) Disomogeneità litologica: ferro, alluminio e litio, ad esempio, presentano una variazione molto pronunciata ad ogni cambio litologico. I loro tenori sono infatti elevati in sedimenti a tessitura finissima, i quali predominano soprattutto nei settori interni della Sacca di Goro. Per tali elementi sono da escludere apporti di origine antropica.

b) Differenze composizionali: alcuni gradienti di concentrazione verticale, come il significativo incremento di titanio nei sedimenti di prodelta, potrebbero marcare l'influenza degli apporti del Po di Goro, che si differenziano composizionalmente da quelli provenienti dal Po di Volano.

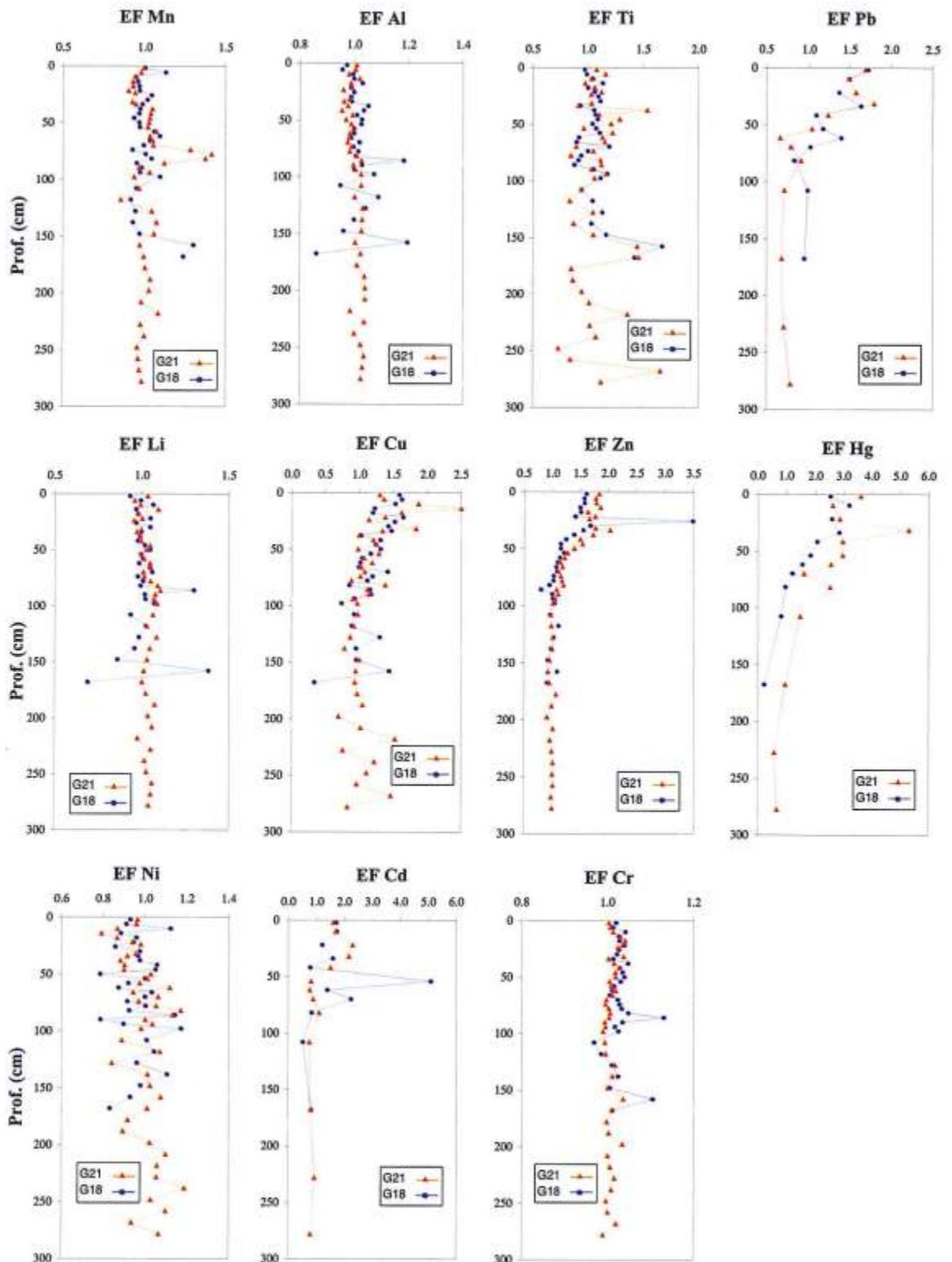


Figura 9 - Andamento verticale dei fattori di arricchimento (EF) degli elementi maggiori ed in tracce nelle "carote di taratura" G18 (linea blu) e G21 (linea rossa).

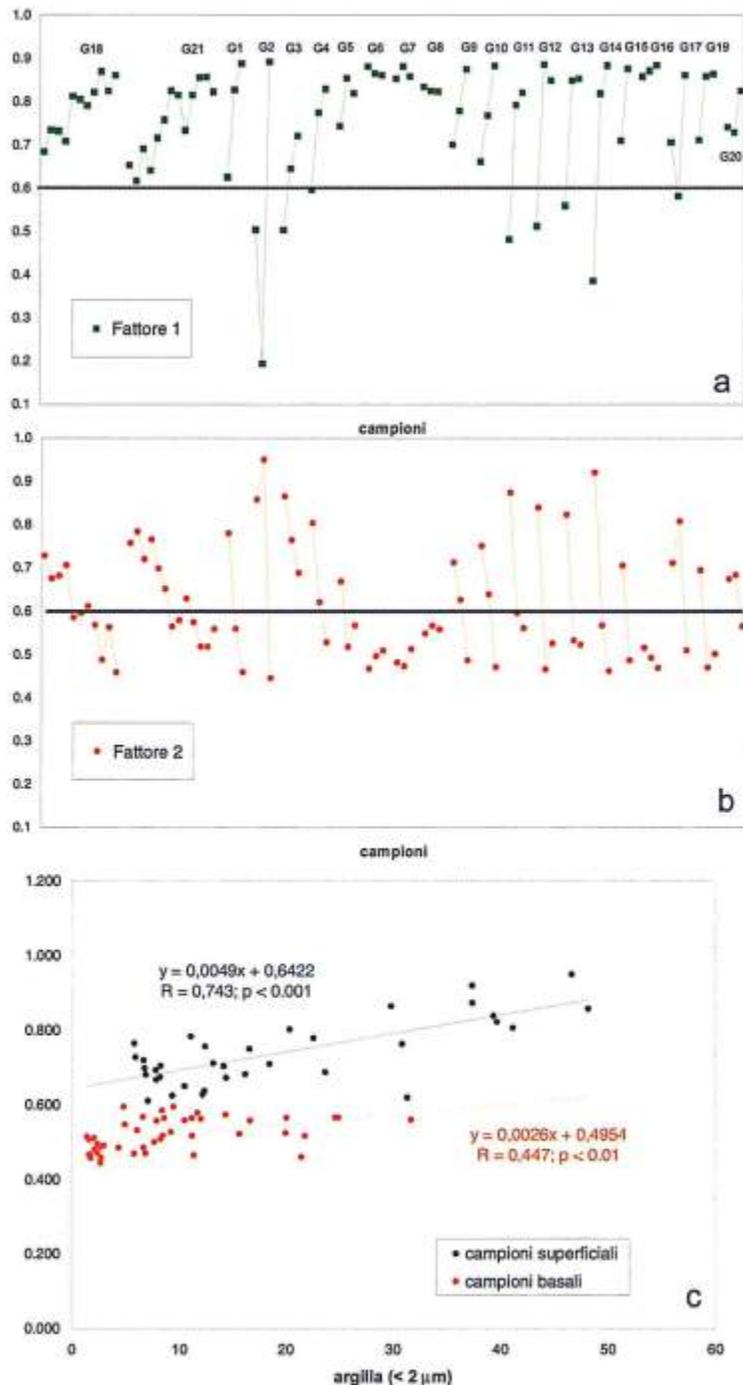


Figura 10 - Distribuzione del Fattore 1 (a) e del Fattore 2 (b) nelle carote. Per ciascuna delle carote, disposte in sequenza, sono riportati da sinistra a destra i livelli dalla superficie alla base. Viene inoltre indicato il valore limite di 0.6 del fattore 2 al di sopra del quale vengono discriminati i campioni alterati. Nella figura c viene evidenziata la relazione tra contenuto in argilla e peso del fattore 2. Sono distinte le due funzioni relative ai campioni più superficiali alterati e quelli intermedio-basali di background.

c) Contaminazione antropica: alcuni elementi persistenti, come Zn, Cu, Cd, Pb e, in particolare, Hg mostrano gradienti di concentrazione legati ad un arricchimento nel livello sedimentario più superficiale. Tale incremento non è legato ad anisotropie della matrice.

Attraverso un procedimento di normalizzazione e la definizione delle funzioni geochemiche di *background* significative per l'area, è stato possibile ottenere i fattori di arricchimento degli elementi in tracce, che consentono di quantificare le anomalie di concentrazione, indipendentemente dalla tipologia della matrice sedimentaria.

I valori di EF dei metalli considerati potenzialmente più pericolosi nell'interazione con la componente biotica all'interno della sacca, mostrano valori massimi significativi:  $> 5$  per Hg,  $> 4$  per Cd e Pb e  $> 2$  per Zn e Cu. Gli arricchimenti si attestano comunque nei livelli superficiali, per uno spessore massimo di circa 70-90 cm. Questi risultati sono stati confermati dall'analisi fattoriale dei parametri considerati.

Sotto il profilo della "qualità" fisico-chimica dei sedimenti, in rapporto allo stato di analoghi ambienti lagunari dell'area nord-adriatica (Venezia, Grado e Marano) e limitatamente ai parametri investigati va evidenziata una contenuta alterazione dei sedimenti della Sacca di Goro.

I risultati ottenuti, soprattutto le diverse elaborazioni grafiche, possono costituire un utile strumento nell'eventualità vengano effettuati dragaggi per il riassetto idrodinamico e la conservazione delle risorse alieutiche, fornendo un'indicazione preliminare delle tipologie di sedimenti, per i quali, in molti casi, possono essere ipotizzate più soluzioni di reimpiego (tombamenti, ricostruzione di barene, rifluimenti, etc.).

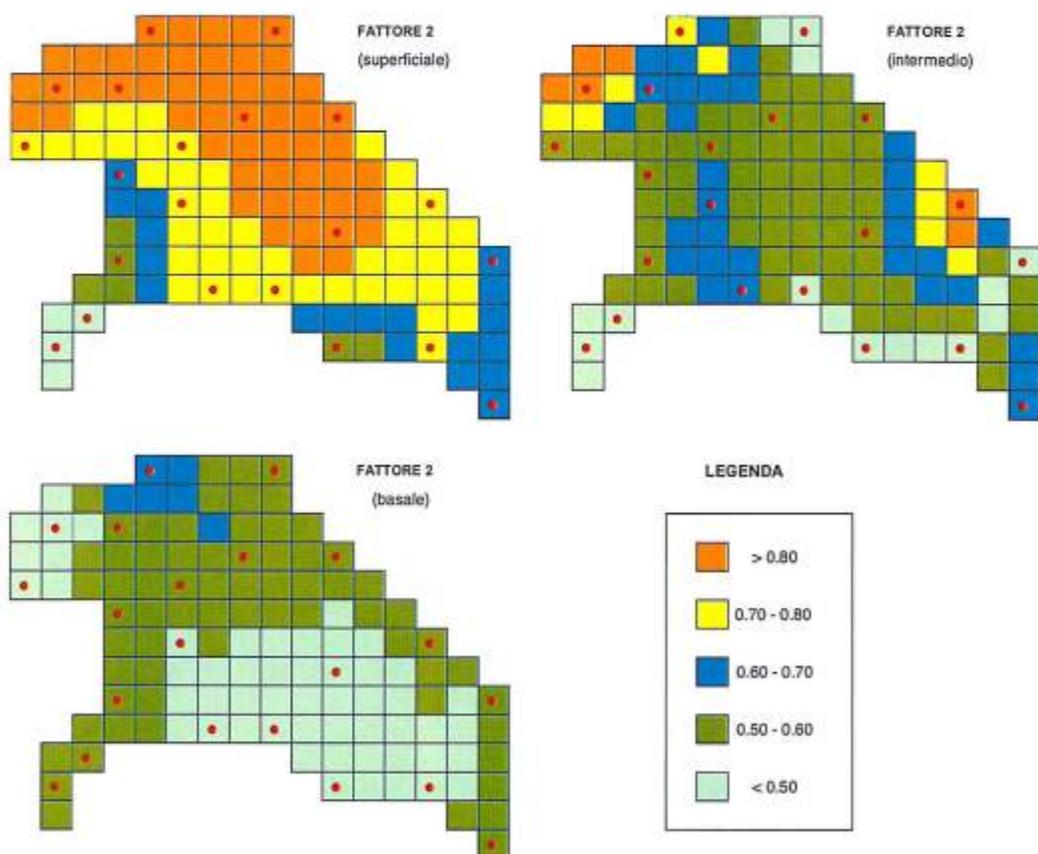


Figura 11 - Distribuzione areale del Fattore 2 per i livelli superficiali, intermedi e basali.

## Ringraziamenti

Gli autori esprimono un sentito grazie a R. Valloni e V. Duchi per i preziosi suggerimenti impartiti durante la revisione critica del testo. Si ringraziano S. Predonzani ed A. Acquavita del Laboratorio di Biologia Marina di Trieste per l'aiuto offerto in alcune analisi geochimiche. Un doveroso ringraziamento va rivolto a G. Calderoni ed U. Tessari per la collaborazione fornita nelle analisi tessiturali dei sedimenti.

Lo studio è stato condotto con finanziamenti della Regione Emilia-Romagna (Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7 - responsabile U. Simeoni), MURST 60% (responsabile R. Marocco) e con fondi COFIN 98 (responsabili R. Dal Cin e G. Fontolan).

## Bibliografia

- Basu A. e Molinaroli E. (1994) - *Toxic metals in Venice lagoon sediments: model, observation, and possible removal*. Environmental Geology, 24: 203-216.
- Bondesan M. e Simeoni U. (1983) - *Dinamica e analisi morfologica statistica dei litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta*. Memorie di Scienze Geologiche, 36: 1-48.
- Brambati A. (1997) - *Metalli pesanti nelle Lagune di Marano e Grado. Piano di studi finalizzato all'accertamento della presenza di eventuali sostanze persistenti nelle Lagune di Grado e Marano e al loro risanamento*. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Regionale dell'Ambiente, Servizio dell'Idraulica, Trieste, 1996: 174 p.
- Brambati A. e Marocco R. (1984) - *Le discariche dei residui di lavorazione di baucciti, fluorine e fosforiti nel Golfo di Venezia*. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Rapporti e Studi, 9: 369-402.
- Caputo M., Pieri L. e Unguendoli M. (1970) - *Geometric investigation of the subsidence in the Po delta*. Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata, 13: 187-207.
- Colizza E., Fontolan G. e Brambati A. (1996) - *Impact of a coastal disposal site for inert wastes on the physical marine environment, Barcola-Bovedo (Trieste, Italy)*. Environmental Geology, 27: 270-285.
- Covelli S. e Fontolan G. (1996) - *Regional geochemical functions to assess the impact of an inert waste disposal along the coastal zone*. In: Taussik J. e Mitchell J. (Eds.) Partnerships in Coastal Zone Management. Samara Publishing Ltd: 655-672.
- Covelli S. e Fontolan G. (1997) - *Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines (Gulf of Trieste, Italy)*. Environmental Geology, 30: 34-45.
- Dal Cin R. e Pambianchi P. (1991) - *I sedimenti della Sacca di Goro (Delta del Po)*. In: Bencivelli S. e Castaldi N. (a cura di) Studio Integrato sull'Ecologia della Sacca di Goro. Provincia di Ferrara, FrancoAngeli, Milano: 253-263.
- De Groot A.J., Salomons W. e Allersma E. (1976) - *Processes affecting heavy metals in estuarine sediments*. In: Burton J.D. e Liss P.S. (Eds.) Estuarine Chemistry. Academic Press, London: 131-157.
- Din Z.B. (1992) - *Use of aluminium to normalize heavy-metal data from estuarine and coastal sediments of Straits of Melaka*. Marine Pollution Bulletin, 24: 484-491.
- Donazzolo R., Hieke Merlin O., Menegazzo Vitturi L., Orio A.A., Pavoni B., Perin G. e Rabitti S. (1981a) - *Heavy metal contamination in surface sediments from the Gulf of Venice, Italy*. Marine Pollution Bulletin, 12: 417-425.
- Donazzolo R., Hieke Merlin O., Menegazzo Vitturi L., Orio A.A., Pavoni B. e Rabitti S. (1981b) - *Metalli pesanti nei Sedimenti di fondo dell'alto Adriatico dall'Isonzo al Po di Levante*. Risorse Biologiche ed Inquinamento Marino, 5: 843-857.
- Fagioli F., Landi S., Locatelli C. e Vecchiotti R. (1991) - *Valutazione del carico di metalli nelle acque, nei sedimenti e nei principali organismi accumulatori*. In: Bencivelli S. e Castaldi N. (a cura di) Studio Integrato Sull'Ecologia della Sacca di Goro. Provincia di Ferrara, FrancoAngeli, Milano: 135-172.
- Fagioli F., Righini F., Landi F. e Locatelli C. (1994) - *Valutazione del carico di metalli nelle acque, nel particolato sospeso, nei sedimenti e nei principali organismi accumulatori (Aprile 1990 - Marzo 1991)*. In: Bencivelli S., Castaldi N. e Finessi D. (a cura di) Sacca di Goro: Studio Integrato Sull'Ecologia - 2° Anno di Ricerche. Provincia di Ferrara, FrancoAngeli, Milano: 177-226.

- Fernex F.E., Span D., Flatau G.N. e Renard D. (1986) - *Behaviour of some metals in surficial sediments of the northwest Mediterranean continental shelf*. In: P.G. Sly (Ed.), *Sediment and Water Interactions, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Interactions Between Sediments and Water*, Springer Verlag, New York: 354-370.
- Förstner U. (1977) - *Sources and sediment associations of heavy metals in polluted coastal regions*. In: L.H. Ahrens (Ed.) *Origin and Distribution of the Elements, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Symposium*, Pergamon Press, Paris: 849-866.
- Frascardi F., Frignani M., Giordani P., Guerzoni S. e Ravaioli M. (1984) - *Sedimentological and geochemical behaviour of heavy metals in the area near the Po River Delta*. *Memorie Società Geologica Italiana*, 27: 469-481.
- Frenet-Robin M. e Ottmann F. (1978) - *Comparative study of the fixation of inorganic mercury on the principal clay minerals and the sediments of the Loire Estuary*. *Estuarine, Coastal & Shelf Science* 7: 425-436.
- Furlan N., Fontolan G., Sartore L., Milani B., Mosca R. e Meriani S. (1999) - *Caratterizzazione chimico-fisica dei sedimenti del porto di Trieste e problematiche derivanti dall'eventuale dragaggio e smaltimento a mare*. *Bollettino Società Adriatica di Scienze*, 79: 3-26.
- Guerzoni S., Frignani P., Giordani P. e Frascari F. (1984) - *Heavy metals in sediments from different environments of a northern Adriatic Sea area, Italy*. *Environmental Geology and Water Sciences*, 6: 111-119.
- Hedges, J.I. e Stern, J.H. (1984) - *Carbon and nitrogen determinations in carbonate-containing solids*. *Limnology and Oceanography*, 29: 657-663.
- Idroser (1994) - *Aggiornamento ed integrazione del piano progettuale per la difesa della costa Adriatica Emiliano-Romagnola, Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna: 276 p.
- IRSA-CNR (1985) - *Metodi analitici per i fanghi: Parametri chimico-fisici*. Quaderni Istituto di Ricerca sulle Acque, 64, vol. 3.
- Loring D.H. (1990) - *Lithium: a new approach for the granulometric normalization of trace metal*. *Marine Chemistry*, 29: 155-168.
- Loring D.H. (1991) - *Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments*. *ICES Journal of marine Sciences*, 48: 101-115.
- Loring D.H. e Rantala R.T.T. (1992) - *Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter*. *Earth Sciences Review*, 32: 235-283.
- Marocco R. (1995) - *Sediment distribution and dispersal in northern Adriatic lagoons (Marano and Grado paralic system)*. *Giornale di Geologia*, 57: 77-89.
- Pugnetti A., Viaroli P. e Ferrari I. (1992) - *Processes leading to dystrophy in a Po River Delta Lagoon (Sacca di Goro): phytoplankton-macroalgae interactions*. *Science of the Total Environment*, 4: 445-456.
- Ramamoorthy S. e Rust B.R. (1978) - *Heavy metal exchange processes in sediment-water systems*. *Environmental Geology*, 2: 165-172.
- Rule J.P. (1986) - *Assessment of trace element geochemistry of Hampton Roads Harbor and Lower Chesapeake Bay area sediments*. *Environmental Geology*, 8: 209-219.
- Salomons W. e Förstner U. (1984) - *Metals in the hydrocycle*. Springer Verlag, New York: pp. 349.
- Shepard F.P. (1954) - *Nomenclature based on sand-silt-clay ratios*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24: 151-158.
- Simeoni U., Borghesi A., Calderoni G., Ciavola P., Fontolan G., Gatti M., Gonella M., Tessari U. e Zamariolo A. (1998) - *Analisi previsionale dell'evoluzione dello Scanno e della Sacca di Goro*. Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7, Relazione Finale, Ferrara. Pp. 273.
- Simeoni U., Bezzi A., Calderoni G., Covelli S., Fontolan G., Sartore L., Tesolin V., Tessari U. e Zamariolo A. (1999) - *Caratteristiche dei sedimenti della Sacca di Goro*. Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7, Relazione Finale, Ferrara. Pp. 89.

- Sinex S.A. e Wright D.A. (1988) - *Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay*. Marine Pollution Bulletin, 19: 425-431.
- Tefry J.H. e Presley B.J. (1976) - *Heavy metals in sediments from San Antonio Bay and the north west Gulf of Mexico*. Environmental Geology and Water Science, 1: 282-294.
- Tesolin V. (1999) - *Aspetti Geochimico-Ambientali della Sacca di Goro. Tesi di Laurea inedita, Università degli Studi di Trieste, Luglio 1999: pp. 86.*
- Van Iperen J. e Helder, W. (1985) - *A method for the determination of organic carbon in calcareous marine sediments*. Marine Geology, 64: 179-187.
- Viaroli P., Pugnetti A. e Ferrari I. (1992) - *Ulva rigida growth and decomposition processes and related effects on nitrogen and phosphorus cycles in a coastal lagoon (Sacca di Goro, Po River delta)*. In: G. Colombo et al. (Eds.) Marine Eutrophication and Population Dynamics. Olsen & Olsen, Fredensborg, Denmark: 77-84.
- Windom H.L. (1992) - *Contamination of the marine environment from land-based sources*. Marine Pollution Bulletin, 25: 32-36.

Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 3/4/2000.

## Analisi della circolazione idrica nella Sacca di Goro mediante modello matematico

Armando Brath<sup>1</sup>, Marco Gonella<sup>2</sup>, Paolo Polo<sup>2</sup> e Massimo Tondello<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DISTART Università di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Viale Risorgimento, 2 – 40136 Bologna

<sup>2</sup>MED INGEGNERIA S.r.l., Riviera Ruzzante, 49 - 35123 Padova

### Riassunto

L'analisi modellistica della circolazione idrica nella Sacca di Goro ha avuto l'obiettivo primario di verificare il funzionamento dell'intervento per il miglioramento della circolazione e del ricambio idrico attraverso la movimentazione naturale delle acque, progettato dalla Provincia di Ferrara nel 1998 e realizzato nel 1999. La costruzione del modello di simulazione è stata basata su un rilievo batimetrico di dettaglio eseguito nella primavera del 1999. I dati per la messa a punto e la calibrazione del modello sono stati desunti da misure effettuate dalla Regione Emilia Romagna nell'autunno 1998 e nel corso di due campagne di rilievi mareografici e correntometrici fatti realizzare appositamente nell'ambito dello studio nei mesi di Aprile e Maggio 1999.

Il modello di simulazione è stato costruito con il codice di calcolo MIKE 21, con un approccio bidimensionale. I limiti di rappresentatività dello strumento di analisi sono stati esaminati e trattati sia sotto il profilo teorico che sotto l'aspetto più diretto dell'applicazione specifica. Utilizzando i dati a disposizione, il modello è stato tarato e verificato in rapporto a diverse condizioni idrodinamiche al contorno. È stata inoltre effettuata un'analisi di sensitività sui parametri idrodinamici che ha definito i limiti ed i range di rappresentatività delle soluzioni.

I risultati del modello confermano sostanzialmente la funzionalità dell'intervento, fornendo una rappresentazione dinamica degli effetti della sua realizzazione in rapporto a condizioni di funzionamento anche diverse da quelle ipotizzate nel progetto.

Pur nella limitazione dovuta all'approccio idrodinamico bidimensionale e alla rappresentatività effettiva delle condizioni di taratura e verifica (che sono affidabili solo per la zona Est della Sacca direttamente interessata dall'intervento) il modello fornisce un'utile base conoscitiva sull'idrodinamica complessiva della Sacca che potrà essere utilizzata per lo sviluppo di una modellistica tridimensionale dell'idrodinamica e dei fenomeni di trasporto-dispersione e qualità dell'acqua.

### Caratteri generali della circolazione idrica nella Sacca di Goro e descrizione dell'intervento esaminato

La Sacca di Goro è un ambiente di transizione da acque interne (dolci) ad acque esterne (marine) in continua evoluzione morfologica. I principali aspetti fenomenologici di interesse per l'analisi della circolazione idrica possono così essere sinteticamente schematizzati e descritti.

L'evoluzione naturale della chiusura a mare della Sacca tende al progressivo prolungamento dello scanno che provoca, nel tempo, una crescente riduzione dello scambio idrico tra acque interne ed acque esterne. Tale condizione evolutiva comporta, oltre che minor ricambio delle acque, anche una minore circolazione idrodinamica delle correnti di marea all'interno della Sacca, con la conseguente riduzione della capacità di rimescolamento idrodinamico e quindi della capacità di trasporto delle

sostanza disciolte o sospese nelle acque per convezione e dispersione. La scarsa mobilità delle acque dà vita, nei periodi caldi, al proliferare della popolazione algale, comportando i noti fenomeni negativi sull'ambiente idrico della Sacca, da cui consegue una forte riduzione della produzione di mitili, che rappresenta la fonte economica primaria della zona.

Per contrastare gli effetti dell'evoluzione morfodinamica in corso sono già stati tentati diversi interventi, finalizzati al miglioramento dello scambio idrico tra ambiente interno ed esterno. Gli interventi attuati sono costituiti essenzialmente nell'escavo di canali lagunari in grado di convogliare con maggior dinamismo le acque di mare all'interno della Sacca e, dove necessario, hanno comportato il taglio o la sistemazione dello scanno.

Tra gli interventi operati in passato si ricordano i seguenti:

- la costruzione dell'idrovora a sei luci posizionata sullo scanno (Figura 1), originariamente collegata ad una rete interna di canali mareali in parte realizzata, ma mai entrata in funzione;
- il successivo taglio abusivo dello scanno che, alterandone l'equilibrio morfologico, ha prodotto l'allargamento smisurato della discontinuità fino alla formazione di una bocca lagunare secondaria di larghezza paragonabile a quella della bocca principale;
- il taglio controllato dello scanno effettuato durante l'estate del 1998 presso la foce del Po di Goro ("Taglio Anconon", Figura 2), che ha portato giovamento alla qualità delle acque più interne nella zona Est della Sacca e che, richiuso in autunno, è stato predisposto per essere ancora attivato in occasione di eventuali emergenze future;
- la realizzazione di un'ampia zona di fitodepurazione, controllata da una serie di paratoie di regolazione che permettono l'ingresso in Sacca, nella zona di minore circolazione, delle acque del Po di Goro, una volta abbattuto il carico di azoto e fosforo.

La difficoltà basilare nella gestione delle acque interne della Sacca consiste nella ricerca della giusta misura di interscambio idrico da realizzare tra laguna e mare affinché il ricambio non sia così limitato da compromettere la qualità delle acque interne, ma non sia d'altra parte tanto consistente da turbare quel giusto equilibrio tra temperatura, salinità e stratificazione delle acque interne che determina le condizioni di alta producibilità di pescato che vanno conservate e, ove possibile, migliorate. L'intervento progettato dalla Provincia di Ferrara (Lamberti, 1998) persegue un ragionevole obiettivo di miglioramento della circolazione nella zona di Gorino a mezzo della realizzazione di un canale mareale che collega la bocca secondaria dello scanno alla zona più interna della Sacca ed è poi connesso alla foce del Po di Goro a mezzo di una struttura munita di paratoie a ventola ad apertura automatica, per differenza di livello, che permettono solo il deflusso unidirezionale dall'interno all'esterno della laguna.

L'intervento, per maggior chiarezza di esposizione, è schematizzato nelle seguenti figure 1, 2, 3 che riportano, a scale diverse, una rappresentazione della Sacca di Goro desunta dalla planimetria di base del Consorzio tra Provincia di Ferrara e Comune di Goro per la gestione della Sacca.

Il funzionamento del sistema di ricircolo così costituito è basato sul ritardo di marea che si verifica tra la zona di sbocco (la foce del Po di Goro) ed il punto più interno della Sacca. Come noto, infatti, l'onda di marea percorre l'alto Adriatico in senso antiorario, e si presenta lungo lo scanno con un certo ritardo da Est verso Ovest, come evidenziato dalle linee cotidali pubblicate sui bollettini di marea.

La foce del Po di Goro è quindi il primo punto del sistema ad essere investito dall'onda di marea crescente. L'onda prosegue quindi il suo corso lungo lo scanno e penetra all'interno della Sacca prima attraverso la bocca secondaria e poi attraverso quella principale. Entrata dalla bocca secondaria l'onda di marea si sviluppa all'interno della Sacca per raggiungere infine il punto più interno, che è quello prossimo alla foce del Po di Goro. L'onda di marea raggiunge tale punto con un certo ritardo rispetto alla condizione esterna e quindi nei pressi della foce del Po di Goro si determina un sensibile dislivello tra interno ed esterno della Sacca (Figura 3).

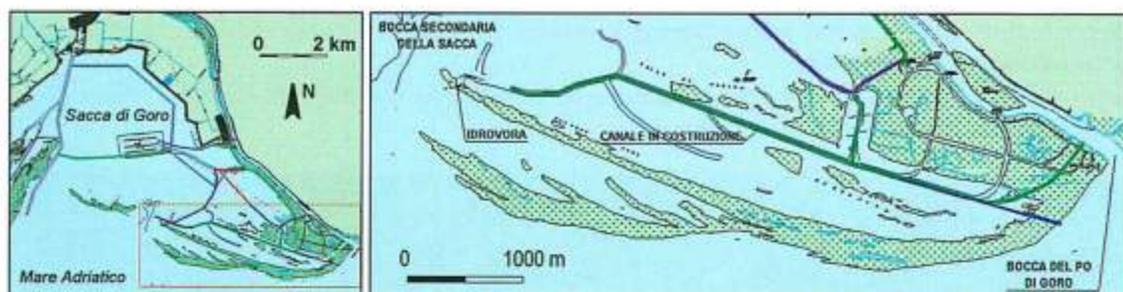


Figura 1 - Planimetria complessiva della Sacca di Goro (a sinistra) e planimetria della zona di intervento con indicazione del tracciato del canale in costruzione.

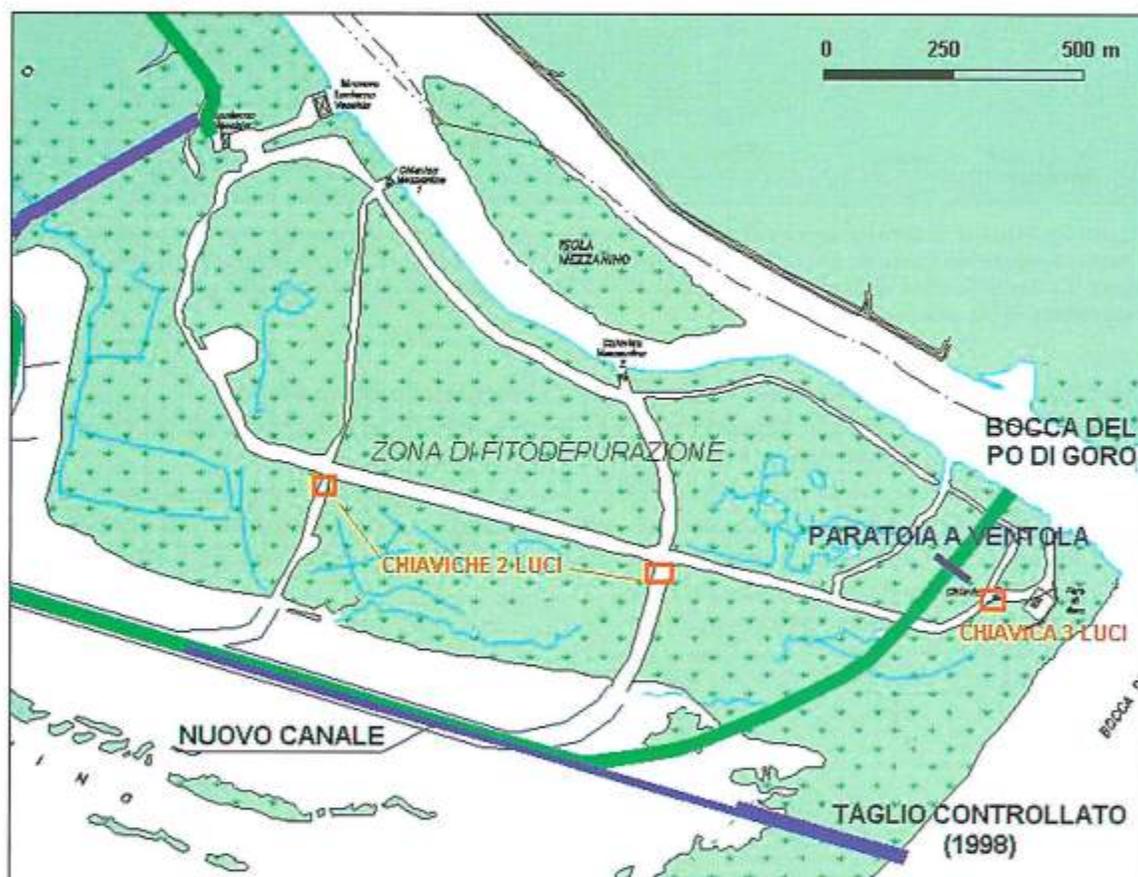


Figura 2 - Particolare della zona di sbocco del nuovo canale. Si noti l'esistente rete idraulica della zona di fitodepurazione, con canali e chiaviche di collegamento tra il Po di Goro e l'interno della Sacca. Si noti anche l'ubicazione del taglio controllato (Anconon) realizzato nell'estate 1998 e successivamente richiuso.

L'esistenza di un apprezzabile ritardo tra la marea esterna e quella interna in tale zona è peraltro confermato dalle osservazioni mareografiche disponibili.

Ad opera di tale dislivello dovrà avvenire l'apertura della paratoia a ventola che determinerà l'uscita del flusso di marea verso l'esterno, fino a quando l'onda di marea esterna non risulterà di nuovo crescente cosicché il livello esterno prevarrà sull'interno e la paratoia a ventola si richiuderà.

Il sistema funzionerà quindi in modo pulsante durante il ciclo di marea scaricando verso mare le acque interne. Per migliorare la circolazione della parte più interna della Sacca e convogliare le acque

favorendone il deflusso attraverso la paratoia a ventola è realizzato il canale lagunare che collega la bocca secondaria alla struttura.

Scopo dell'analisi modellistica qui presentata è stata la verificata dinamica, su modello numerico di simulazione, del funzionamento dell'intervento.

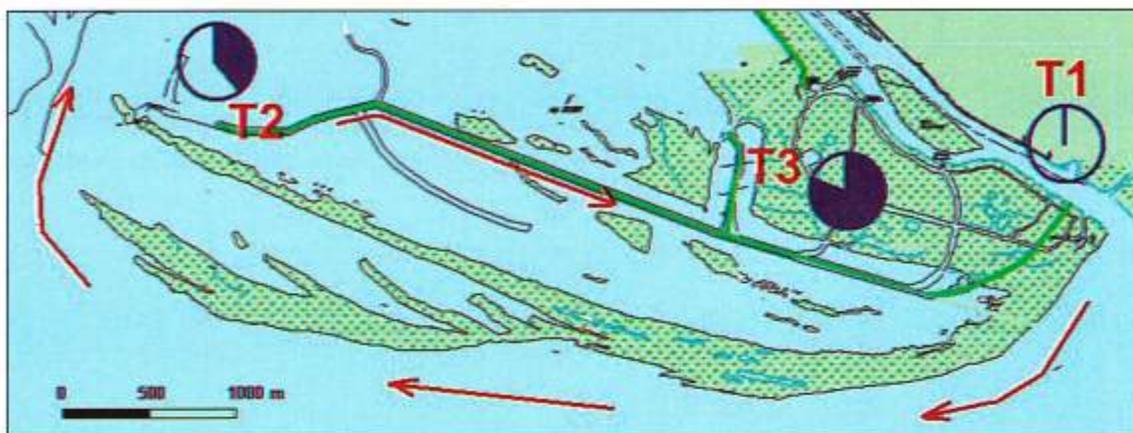


Figura 3 - Schema di funzionamento della soluzione per la movimentazione naturale delle acque della Sacca. L'onda di marea si muove da Est a Ovest lungo lo scanno e penetra poi nella Sacca raggiungendo per ultimo il punto T3. La differenza di livello dovuta al ritardo tra T3 e T1 determina l'apertura della paratoia a ventola e l'espulsione di un certo volume d'acqua.

#### Descrizione del codice di calcolo utilizzato per la costruzione del modello

Per la costruzione del modello idrodinamico della Sacca è stato utilizzato il codice di calcolo MIKE 21, prodotto dal Danish Hydraulic Institute (DHI, 1993; Abbott et al., 1979).

Il modulo idrodinamico HD del modello MIKE 21 risolve le equazioni complete del moto di de St. Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema di de St. Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad [1]$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} P_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad [2]$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fV V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} P_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned} \quad [3]$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$  = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$  = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$  = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$  = coefficiente di scabrezza di Chezy;

$g$  = accelerazione di gravità;

$f(V)$  = fattore d'attrito del vento;

$V, V_x, V_y(x,y,t)$  = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$  = parametro di Coriolis;

$P_a(x,y,t)$  = pressione atmosferica;

$\rho_w$  = densità dell'acqua;

$x,y$  = coordinate spaziali;

$t$  = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

$S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}$  = componenti del radiation stress.

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio  $\tau$  che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y. La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è valutato secondo due modalità alternative: dipendente dal flusso locale oppure dipendente dalla velocità locale. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o infine come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski (1963):

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad [4]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale,  $\Delta$  è la dimensione spaziale della griglia e  $c_s$  è una costante compresa tra 0.25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) viene valutato come:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} hE \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad [5]$$

Le equazioni del modello sono risolte alle differenze finite utilizzando lo schema ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con l'algoritmo DS (Double Sweep, v. Abbott, 1979).

Oltre alla batimetria, assegnata su una griglia di calcolo regolare, devono essere assegnati i valori di scabrezza del fondo per il calcolo delle resistenze e deve essere scelta una formulazione od un valore di riferimento del parametro  $E$  per la valutazione del termine di resistenza turbolenta. I dati di input sono completati dai livelli e dalle portate assegnate lungo la frontiera del modello. I risultati del modello rappresentano la situazione idrodinamica ricostruita per effetto delle forzanti idrodinamiche considerate. Essenzialmente possono essere rappresentati i campi delle altezze d'acqua, di concentrazione del flusso ed il campo vettoriale di velocità.

### **Limiti di rappresentatività del modello**

Il sistema di equazioni di de St. Venant è bidimensionale, cioè simula il comportamento di un corpo idrico nello spazio piano, relativamente agli assi cartesiani  $x$  e  $y$ , facendo riferimento allo schema di flusso di un fluido verticalmente omogeneo. Il codice non è quindi in grado di rappresentare la stratificazione verticale del fluido che è considerato omogeneo, cioè dotato di un unico valore rappresentativo di densità, né di rappresentare l'effettiva distribuzione della velocità lungo la verticale. Nella realtà i fenomeni quanti-qualitativi che si esplicano nella Sacca di Goro risentono in modo più o meno marcato anche della presenza di stratificazioni verticali dovute alla diversa densità delle acque dolci e di acque salate marine che vengono a contatto all'interno della laguna. Essendo comunque i battenti idrici limitati (al massimo 3+4 m nei punti più profondi dei canali, ma mediamente di circa 1 m per gran parte dell'area interessata) il problema idrodinamico può essere iscritto a quello delle "acque basse" in cui prevale l'effetto dei termini bidimensionali del moto rispetto a quello della stratificazione verticale. Sulla base di tali considerazioni si può ritenere, almeno in prima approssimazione, accettabile e significativo l'approccio seguito.

### **Campagne di monitoraggio**

I dati per la taratura e la verifica del modello idrodinamico e, più in generale, per la comprensione delle caratteristiche del moto mareale all'esterno ed all'interno della Sacca di Goro sono stati raccolti nel corso di una serie di campagne di misura realizzate in parte dalla Regione Emilia-Romagna, nell'ambito del controllo del funzionamento del Taglio Anconon, ed in parte realizzate ad hoc nell'ambito dello studio (Regione Emilia Romagna, 1999).

Prima di progettare e realizzare le campagne di misura per la raccolta dei dati necessari allo studio, ci si è occupati di rintracciare, organizzare e valutare le informazioni esistenti.

Per il controllo del funzionamento del "Taglio Anconon" la Regione Emilia-Romagna, Ufficio Provinciale Difesa del Suolo di Ferrara, aveva predisposto nel mese di Agosto 1998, una campagna correntometrica sul canale artificiale che ha reciso lo scanno, misurando in continuo la velocità con un correntometro bidirezionale. I dati di velocità sono stati rapportati alla sezione del canale ottenendo i corrispondenti valori di portata entrante ed uscente attraverso il taglio. L'integrazione dei valori di portata ha fornito i volumi transitati lungo il canale che sono stati di circa 20 Mm<sup>3</sup> in uscita dalla Sacca verso il mare e di circa 18 Mm<sup>3</sup> in entrata dal mare alla Sacca, con un bilancio negativo di circa 2 Mm<sup>3</sup> nei 15 giorni di misurazione ed una media di circa 130.000 m<sup>3</sup> al giorno. I dati misurati hanno confortato la scelta progettuale dell'intervento prima descritto a mezzo della realizzazione del canale e della paratoia a ventola: il "Taglio Anconon", realizzato in una posizione prossima a quella prevista nel progetto e quindi con paragonabili ritardi di marea, sebbene non regolato, aveva infatti mostrato una buona efficacia.

Nel periodo estivo di misura tutte le opere di regolazione dell'area di fitodepurazione erano aperte (per migliorare lo scambio con il Po e quindi la movimentazione delle acque) e non sono quindi stati eseguiti rilievi mareografici, che sono però stati realizzati in tre situazioni differenti appena chiuse

le strutture. Le osservazioni di livello sono state eseguite su un arco di 24 ore, a cadenza oraria, con rilievi a vista sui due lati della chiavica 3 luci che collega la Sacca alla foce del Po di Goro, nei giorni 22 settembre 1998 (con l' "Anconon" ancora aperto), 22 ottobre 1998 (appena chiuso l' "Anconon") e 22 novembre 1998 (con "Anconon" chiuso da tempo). I dati rilevati mostrano con sufficiente evidenza un ritardo di marea di circa 1 ora tra esterno ed interno, il mantenimento pressoché inalterato delle armoniche d'onda e gli stessi valori di massimo e minimo.

Per quanto siano poi state realizzate nella primavera del 1999 altre campagne di misura diretta, le osservazioni effettuate nell'autunno del 1998 hanno avuto l'importante peculiarità di essere state eseguite senza alcuna interferenza tra interno ed esterno (se non il taglio dell' "Anconon" per le misure eseguite nel mese di settembre), cioè senza alterazioni di flusso legate alla connessione tra Sacca e Po di Goro attraverso l'area di fitodepurazione. Per questo motivo tali dati sono risultati basilari per la taratura del modello di simulazione.

### Costruzione della batimetria del modello

La costruzione della batimetria su una maglia quadrata atta ad essere utilizzata dal modello numerico è stata basata sul rilievo ad hoc effettuato nel mese di aprile 1999. Sono stati rilevati circa 90.000 punti disposti su linee di navigazione che percorrono la Sacca in direzione nord-sud, ad una distanza relativa di circa 150 m l'una dall'altra. Un tale rilievo è genericamente adatto per la ricostruzione batimetrica di zone che non presentino forti variazioni di profondità. In presenza di canali, come nel caso in esame, la metodologia di esecuzione del rilievo comporta ovvi problemi nell'interpolazione dei dati misurati. Gli usuali interpolatori matematici calcolano infatti la profondità in un punto di griglia come media, opportunamente pesata, dei punti rilevati che si trovano all'interno di un raggio definito. Un punto di griglia che si trova in corrispondenza di un canale, ma è distante dai punti rilevati, risente fortemente anche dei punti a basso fondale. Interpolando quindi i soli punti rilevati si ottiene una rappresentazione geometrica della zona oggetto di studio poco reale, in quanto le discontinuità sono tendenzialmente "smussate".

Per ovviare a questo problema, utilizzando un apposito programma realizzato ad hoc, sono state ricostruite le sezioni verticali determinate da ogni linea di rilievo. Tali sezioni sono state quindi sovrapposte, in ambiente CAD, ai punti planimetrici del rilievo ottenendo così una rappresentazione complessiva quasi-tridimensionale della batimetria dei fondali. Su tale base informativa è stato possibile individuare la posizione dei canali e quindi aumentare il numero di punti rappresentativi del fondale, lungo il loro sviluppo, mediante interpolazione lineare tra due sezioni successive. In tal modo è stato incrementato il numero originario di punti rilevati costituendo un campione di dati significativo per la successiva interpolazione.

Un ulteriore problema è stato determinato dal fatto che il recente rilievo non prevedeva l'individuazione delle zone emerse, ma si fermava alla batimetria  $-0.5$  m. È stato quindi utilizzato un rilievo pregresso per la definizione delle zone emergenti, al perimetro delle quali è stata assegnata una quota rappresentativa di  $-0.2$  m. Alle zone rimaste scoperte dal rilievo e dalla ricostruzione delle terre emerse è stata assegnata una profondità indicativa di  $-0.4$  m.

Il passo successivo nella costruzione della batimetria è stato la scelta del passo spaziale della griglia a maglia quadrata necessaria al codice idrodinamico. Solitamente la scelta deriva da un compromesso tra il dettaglio richiesto ai risultati e i tempi di calcolo. Infatti più piccolo è il passo di griglia maggiore è l'accuratezza della soluzione, ma maggiore è il tempo di calcolo, che cresce con potenza di 3 rispetto al passo di griglia. Nel caso in esame, viste le dimensioni del dominio di calcolo e soprattutto quelle dei canali, che sono gli elementi più piccoli da rappresentare, è stata adottata una griglia con passo 20 m. La batimetria ottenuta (Figura 4) ha una maglia di dimensione di circa 11.7 km in direzione Est-Ovest e di circa 6.2 km in direzione Nord-Sud, per un totale di oltre 180.000 punti di cui circa 110.000 di calcolo.

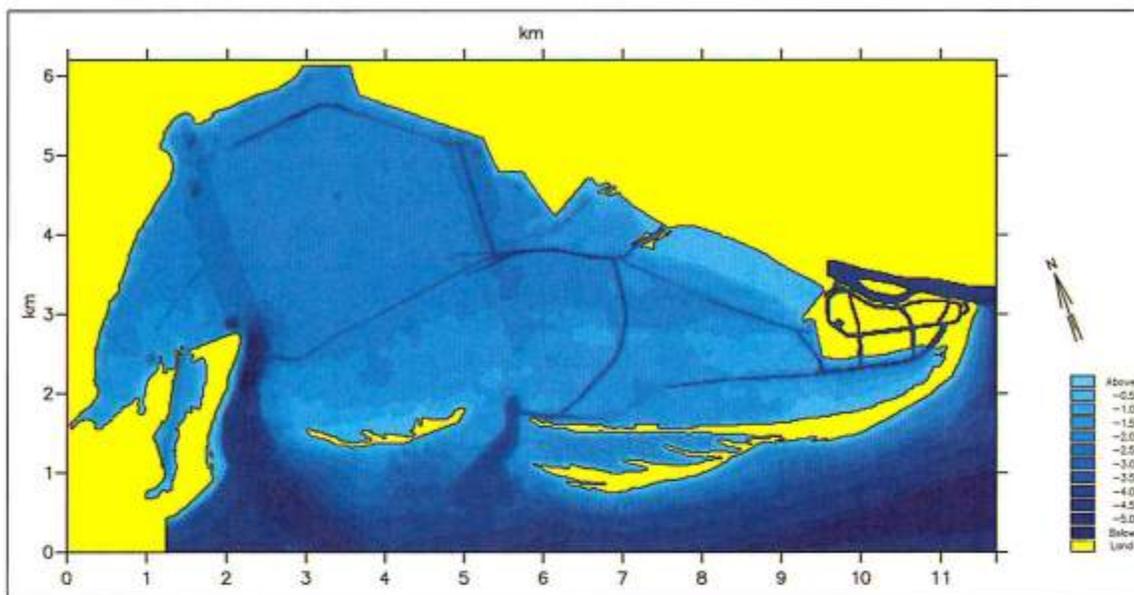


Figura 4 - Batimetria del modello di simulazione ricostruita sulla base dei punti di rilievo tenendo conto della presenza dei canali di marea esistenti e in fase di costruzione.

### Parametri idrodinamici

Nel caso del modello idrodinamico il più importante parametro da assegnare è la scabrezza del fondo, che descrive le perdite di energia per attrito. In realtà con il valore di tale coefficiente, di difficile misurazione e quindi normalmente utilizzato come parametro di taratura, si usano rappresentare tutte le perdite di carico distribuite, anche se di altra natura rispetto all'attrito sul fondo.

Da simulazioni preventive effettuate su una batimetria approssimata e con onda di marea sinusoidale, è stato rilevato come il sistema sia praticamente insensibile a differenziazioni di scabrezza tra canali e zone a basso fondale. Molto probabilmente esistono in realtà differenze di scabrezza tra diverse aree, legate anche alla diversa densità degli allevamenti di mitili, come pure variazioni di tipo stagionale: i dati a disposizione per la taratura non sono stati però sufficienti per valutare differenze di questo tipo. Nelle simulazioni effettuate è stato considerato, infine, un valore di scabrezza pari a  $40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  secondo la formulazione di Strickler.

Un altro parametro assegnato al modello è l' "eddy viscosity" che regola la "macro turbolenza" del sistema e definisce quindi l'entità delle perdite di carico legate alla formazione di vortici. Nel caso in esame, considerata la dimensione della griglia di calcolo ed il tipo di circolazione idrodinamica da simulare, la "viscosità" dovuta alla formazione di vortici non risulta importante, per cui è stato adottato un valore di  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  che l'esperienza ha dimostrato idoneo a prevenire l'insorgere di instabilità lungo le frontiere del modello dove vengono imposte le condizioni al contorno.

### Condizioni al contorno

Mediante la definizione delle condizioni al contorno si impongono anche le forzanti al sistema. Nel caso in esame le frontiere aperte del modello sono il lato Est e il lato Sud (cfr. Figura 4), dove devono essere definiti i livelli determinati dall'evoluzione della marea nell'alto Adriatico. L'andamento spazio-temporale di tali livelli, compresa la sfasatura lungo lo scanno, costituisce la forzante principale del moto all'interno della Sacca. La definizione dei livelli dovuti all'onda di marea è piuttosto complessa. Infatti, mentre è ragionevole considerare lo stesso livello lungo tutta la frontiera Est, ciò non appare lecito lungo la frontiera Sud. L'onda di marea si presenta infatti all'estremo Ovest del contorno (presso la foce del Po di Volano) con un certo ritardo rispetto all'estremo Est (presso la foce del Po di Goro). Il ritardo, come è stato definito in precedenza, dipende dalla combinazione

degli sfasamenti delle armoniche che costituiscono l'onda di marea. Oltre all'effetto del ritardo bisogna anche tenere presente che, nella realtà, anche la forma dell'onda tra i due estremi della frontiera risulta modificata.

Per una corretta interpretazione del fenomeno sarebbero necessari rilievi mareografici di almeno un anno da effettuarsi in almeno due punti esterni alla Sacca, in modo tale da individuare le armoniche principali e i loro sfasamenti. Non essendo possibile una simile analisi, vista la mancata disponibilità dei dati necessari, si è optato per una traslazione rigida dell'onda di marea da Est a Ovest assegnando un ritardo basato sull'analisi dei dati registrati e perfezionato mediante la taratura del modello. I valori di oscillazione dei livelli nei punti di calcolo che costituiscono la frontiera Sud del modello sono stati determinati mediante interpolazione lineare.

## **Taratura e verifica del modello di simulazione**

### ***Taratura del modello***

Per la taratura del modello è stato utilizzato il rilievo mareografico del Novembre 1998. La scelta di tale evento è stata dettata dal fatto che in quel periodo erano chiuse tutte le chiaviche della zona di fitodepurazione, come pure il taglio dell'Anconon. Il sistema risulta quindi regolato solamente dall'onda di marea esterna non essendovi alcuna connessione tra interno ed esterno della Sacca nella zona di interesse.

La batimetria utilizzata per la taratura è stata ottenuta dal rilievo, escludendo però i canali scavati successivamente al mese di Novembre 1998, in modo da ottenere la massima rappresentatività rispetto alle condizioni di simulazione.

Come condizione al contorno per il lato Est è stata utilizzata la marea rilevata alla chiavica "tre luci", sul lato esterno, cioè verso il Po (cfr. Figura 2). Dai risultati di alcune simulazioni preliminari è stato infatti verificato che il ritardo di marea tra la frontiera Est del modello e la chiavica "tre luci" è praticamente trascurabile.

Come parametro di taratura è stato utilizzato il ritardo di marea tra Est e Ovest lungo la frontiera meridionale del modello, considerando la scabrezza costante e pari a  $40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ . Sono state effettuate 3 simulazioni con ritardi di 20, 40 e 60 minuti. I corrispondenti livelli ottenuti presso la chiavica tre luci, sul lato interno, cioè verso la Sacca, sono stati confrontati con quelli misurati. Dall'analisi effettuata è risultato evidente, come ci si attendeva, che il ritardo di marea non è una costante ma varia durante le fasi di marea. La taratura sull'evento del Novembre 1998, pur mettendo in luce le limitazioni che una traslazione rigida dell'onda di marea causa, ha comunque consentito di individuare l'intervallo di variazione tipico del ritardo di marea lungo la frontiera Sud del modello, da Est a Ovest, che è risultato pari a 40-60 minuti.

Per confermare tale indicazione sono state effettuate delle verifiche sugli altri eventi misurati.

### ***Verifica sull'evento del Settembre 1998***

Durante l'evento del Settembre 1998 risultava aperto il "Taglio dell'Anconon" con uno scambio di volumi d'acqua tra mare e Sacca in grado di influenzare i livelli nel punto interno di misura. Nella batimetria utilizzata per la verifica del modello è stato quindi inserito il suddetto taglio, ottenendo come risultato delle simulazioni anche l'entità dei deflussi attraverso il canale di collegamento tra Sacca e mare. La soluzione ottimale, in questo caso, è stata trovata assumendo un ritardo di marea di 1 ora (Figura 5). Il risultato appare molto buono soprattutto per l'onda di marea centrale, mentre nella prima fase discendente e nell'ultima crescente l'onda calcolata è mediamente in anticipo di 10 minuti rispetto a quella rilevata.

Durante la fase discendente della marea esterna i livelli in Sacca sono generalmente superiori a quelli in mare per cui il volume scambiato è in uscita dalla Sacca, in fase crescente invece è in entrata. Sfortunatamente non sono disponibili valori di volumi scambiati durante l'evento, in quanto le misure correntometriche sull'Anconon sono state effettuate solo per il periodo dal 7 al 24 Agosto 1998. Si è notato, in ogni caso, che i volumi misurati durante la campagna di rilevamento sono del-

lo stesso ordine di grandezza di quelli calcolati dal modello ( $6+700.000 \text{ m}^3$  per ogni semiciclo di marea) a conferma della rappresentatività anche quantitativa del modello.

Si può quindi concludere che, anche nel caso analizzato (che risulta più complesso di quello utilizzato per la taratura a causa della presenza del taglio), il modello fornisce risultati corretti, nel limite delle approssimazioni e delle schematizzazioni adottate.

### Verifica sull'evento di Ottobre 1998

Durante l'evento di Ottobre 1998 il taglio dell'Anconon era appena stato chiuso, per cui la situazione che si presentava era del tutto simile a quella dell'evento di Novembre. E' stata quindi utilizzata la stessa batimetria adottata per la taratura. I risultati migliori sono stati ottenuti con un ritardo di 40 minuti e sono riportati nella figura seguente.

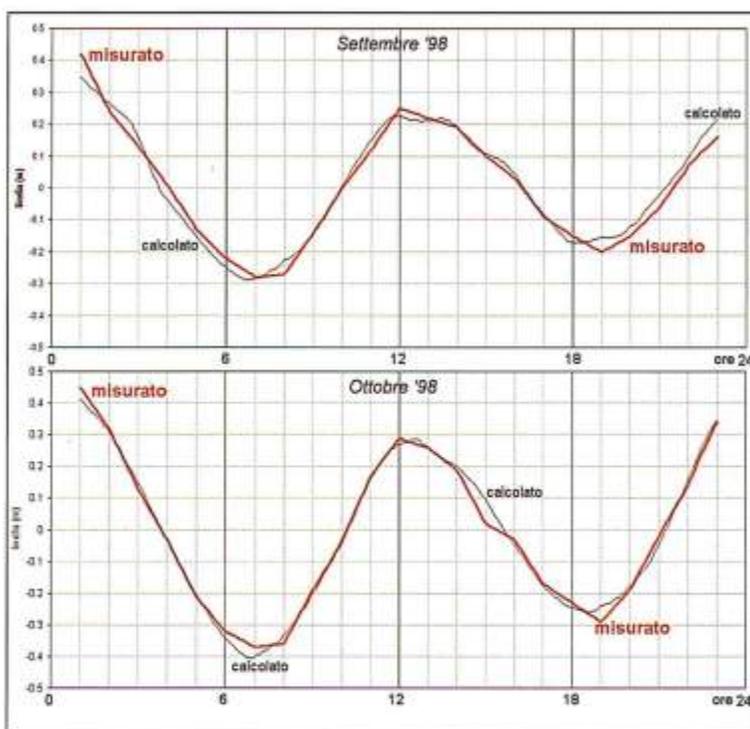


Figura 5 - Confronto tra il livello misurato e quello calcolato in corrispondenza della chiavica tre luci, lato interno, per l'evento di Settembre 1998 (ritardo di marea 1 ora) e per l'evento di Ottobre 1998 (ritardo di marea 40 minuti).

Il risultato è, in generale, soddisfacente. Le uniche discrepanze significative si hanno sui cavi e sono probabilmente legate ai problemi di inerzia del sistema di fitodepurazione non adeguatamente descritti dal modello a causa dei problemi legati alla rappresentazione della batimetria delle zone a basso fondale menzionati in precedenza. Una così buona approssimazione nella ricostruzione dell'onda misurata è probabilmente legata al fatto che per le particolari armoniche che costituiscono l'onda di marea del periodo esaminato, il ritardo di traslazione lungo lo scanno è rimasto pressoché costante, avvicinandosi all'ipotesi adottata per la costruzione della condizione al contorno.

### Verifica sull'evento di Maggio 1999

L'ultimo evento utilizzato per la verifica è quello di Maggio 1999. Le misure sono state effettuate subito dopo il rilievo batimetrico, per cui è stata utilizzata la geometria dei fondali ricostruita sulla base del rilievo, in cui sono evidenti i canali mareali in corso di realizzazione (Figura 4).

Nel periodo di simulazione le chiaviche della zona di fitodepurazione erano tutte aperte. Il sistema idraulico risulta quindi più complesso dei precedenti, soprattutto per il fatto che i punti di misura sono fortemente influenzati dallo scambio d'acqua attraverso le chiaviche.

È stato considerato un ritardo di marea di 40 minuti. I risultati sono riportati nella figura seguente. Anche in questo caso, pur con la complessità del sistema idraulico legata all'apertura delle chiaviche, i risultati appaiono positivi.

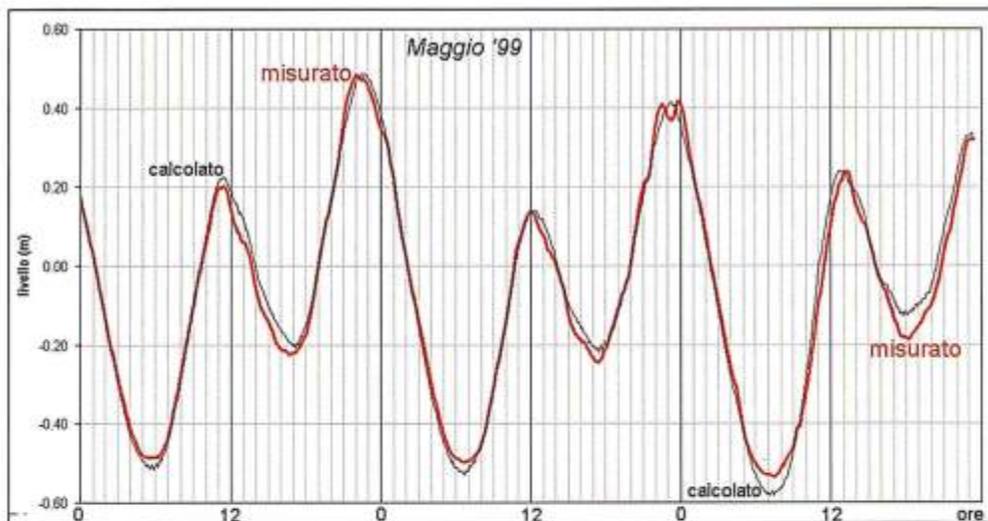


Figura 6 - Confronto tra il livello misurato e quello calcolato in corrispondenza della chiavica tre luci, lato interno, per l'evento di Maggio 1999. Ritardo di marea 40 minuti.

### Conclusioni sulla fase di verifica del modello

L'insieme delle situazioni di verifica mette in luce come il modello sia in grado di descrivere in modo adeguato l'idrodinamica della Sacca di Goro pur con le incertezze legate all'imposizione delle condizioni al contorno. Si intende sottolineare che le fasi di taratura e verifica, ed anche la successiva fase di analisi di sensitività dei parametri, sono state condotte su misure di riferimento effettuate nella zona di interesse per la localizzazione dello sbocco del nuovo canale mareale in corso di costruzione. E' quindi da presumere che l'affidabilità del modello risulti buona per la simulazione delle fenomenologie che avvengono nella zona Est della Sacca, cioè verso la Sacca di Gorino, come confermato dai risultati della fase di verifica appena discussi, mentre manca un riscontro significativo per l'insieme delle condizioni idrodinamiche che si verificano nella zona Ovest della Sacca.

### Analisi di sensitività dei parametri

Nella taratura del modello e nelle successive verifiche è stato utilizzato come unico parametro il ritardo di marea, considerandolo preponderante rispetto agli altri e, purtroppo, non determinabile per altra via che la taratura stessa. Per valutare l'importanza degli altri fattori è stata effettuata un'analisi di sensitività sui parametri giudicati più importanti. Come evento di riferimento è stato scelto quello di Ottobre 1998, in quanto ha fornito il risultato più prossimo ai valori misurati.

### Scabrezza

Come è stato sopra accennato alcune valutazioni preliminari hanno suggerito di trascurare una differenziazione di scabrezza tra canali e zone a basso fondale. Il valore utilizzato,  $40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  (Strickler) è un valore tipico per ambienti analoghi a quello esaminato. La sensitività del modello rispetto alla scabrezza è stata quindi testata relativamente ad altri 2 valori di scabrezza pari rispettivamente a 30 e  $50 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ . Il variare della scabrezza da 40 a  $50 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  porta delle modestissime variazioni, mentre la riduzione a  $30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  comporta degli sfasamenti che possono arrivare fino a 20 minuti, quindi dell'ordine di grandezza delle variazioni imposte per i ritardi delle condizioni al contorno. Di conseguenza si può concludere che sicuramente questo sarebbe il parametro fondamentale di taratura se

si avessero maggiori informazioni sulle condizioni al contorno.

### ***Livello medio del mare***

Un'onda elementare si propaga con velocità pari a  $\sqrt{gh}$ , quindi il tirante d'acqua ( $h$ ) è fondamentale per la propagazione della marea. Le variazioni del livello marino oltre che dall'escursione di marea astronomica sono influenzate anche da fattori meteorologici (fenomeni di "acqua alta") per cui la stessa oscillazione di marea si può presentare con livelli medi diversi. La sensitività del modello a questo parametro è stata analizzata perché negli eventi di Settembre, Ottobre e Novembre 1998 il rilievo è stato effettuato rispetto una quota relativa, senza nessun riferimento al medio mare. I valori sono stati quindi riportati ad un medio mare fittizio, per cui è risultato utile indagare l'influenza sui risultati di un diverso livello del medio mare. Sono stati analizzati due casi: un sovrizzo di 20 cm e uno di 50 cm. In valore assoluto i livelli sono ovviamente influenzati dal medio mare, ma per la finalità dell'applicazione del modello è opportuno fare riferimento alla variazione dello sfasamento di marea. Gli anticipi dovuti al maggior tirante d'acqua raggiungono al massimo i 5 minuti per il sovrizzo di 50 cm: si è quindi concluso che il livello medio mare non appare importante per i fini preposti alla modellazione.

### ***Vento***

Il vento influenza i livelli all'interno della Sacca, come pure, in parte, la circolazione idrodinamica. In questo caso per vento si intende quello locale, mentre le condizioni di circolazione atmosferica e variazione barometrica a grande scala che generano i noti fenomeni di "acqua alta" nel Nord Adriatico sono già stati inclusi nell'analisi dell'influenza di diverse quote del medio mare.

È stato analizzato, a titolo esemplificativo, l'effetto del vento che spira da Ovest e quindi tende ad innalzare i livelli presso il punto di misura interno. Sono state considerate 2 velocità pari rispettivamente a 5 e 10 m/s. Dai risultati si è osservato che il vento, oltre ad innalzare i livelli, ritarda anche leggermente l'onda, fornendo un duplice effetto positivo (sullo sfasamento oltre che sul tirante) per il deflusso dalla Sacca verso l'esterno attraverso la paratoia a ventola.

## **Applicazione del modello idrodinamico nella verifica del progetto per la movimentazione naturale delle acque all'interno della Sacca**

### ***Predisposizione del modello per le verifiche idrauliche***

La geometria del modello è stata modificata inserendo nella batimetria di rilievo i nuovi canali in progetto. Particolare cura è stata necessaria per la rappresentazione della paratoia a ventola e del suo funzionamento. Nel codice di calcolo utilizzato, MIKE 21, allo stato attuale non esiste ancora la possibilità di rappresentare in modo diretto il funzionamento di una struttura mobile, anche se tale opzione modellistica è in fase di definizione e sviluppo. Utilizzando l'esperienza già maturata in altre applicazioni simili, il funzionamento della paratoia a ventola unidirezionale è stato però correttamente rappresentato ricorrendo alla seguente schematizzazione di calcolo.

Sono state realizzate due versioni della medesima batimetria del modello che differiscono solamente per avere il canale di collegamento tra la laguna ed il mare rispettivamente chiuso o aperto.

Utilizzando la condizione di canale totalmente aperto è stata effettuata una prima simulazione di calcolo valutando gli istanti in cui, nell'ipotetica totale apertura del canale, si presenta l'inversione tra flusso entrante e flusso uscente. Si è quindi proceduto all'esecuzione di simulazioni successive, collegate a mezzo di "hotstart" di calcolo, utilizzando la batimetria con il canale aperto nelle condizioni di flusso uscente e quella con canale chiuso nei periodi che corrispondevano a flusso entrante. Gli "hotstart" di calcolo consistono nel considerare, come condizione iniziale di avviamento del modello la situazione finale calcolata dalla simulazione precedente.

Per effettuare, infine, una simulazione completa e continua del funzionamento del sistema è stato adottato il seguente procedimento: sono state calcolate le portate che fuoriescono dal canale nel corso delle simulazioni alternate; nella batimetria con il canale chiuso sono state inserite delle con-

dizioni "interne" ai due lati della chiusura, corrispondenti rispettivamente a punti "pozzo" nel lato interno e a punti "sorgente" nel lato esterno; alle condizioni interne è stato assegnato l'andamento temporale del flusso calcolato nel corso delle simulazioni alternate effettuate in precedenza e così è stato possibile simulare in continuo il flusso nullo in entrata e la reale portata in uscita.

### **Condizioni di marea utilizzate nelle verifiche**

La verifica del funzionamento del sistema è stata eseguita in relazione a tre forme dell'onda di marea caratteristiche dell'alto Adriatico, in particolare facendo riferimento alle oscillazioni e alle relative armoniche registrate alla stazione di Porto Corsini a Ravenna.

Uno studio effettuato per una tesi di laurea (Bazzi, 1994) aveva considerato un periodo di registrazione di circa due anni e mezzo delle maree a Porto Corsini e, per mezzo di un'analisi statistica di frequenza, aveva individuato le tre forme d'onda che si presentano nel maggior numero di giorni all'anno. Le tre onde sono rispettivamente una tipica onda di marea mista diurna/semidiurna (marea 1) che si riscontra nel 23% circa dei casi, un'onda di marea tipicamente semidiurna (marea 2) nel 19% circa dei casi ed un'onda di marea diurna (marea 3) nel 22% circa dei casi (Figura 7). Utilizzando le costanti armoniche pubblicate nelle tavole di marea per la stazione di Porto Corsini ed i periodi di riferimento indicati nella bibliografia citata, per ognuna delle tre onde tipiche, sono state ricostruite con il modulo Tidal Analysis del codice MIKE 21 (Danish Hydraulic Institute, 1993) le oscillazioni temporali relative alle tre forme d'onda.

Le onde così costruite sono state assegnate alla frontiera Est del modello, mentre sulla frontiera Sud è stato calcolato l'andamento del livello marino considerando istante per istante una variazione lineare del livello lungo la frontiera e un ritardo fisso di marea tra la foce del Po di Goro e la foce del Po di Volano, pari a 40 minuti, con le approssimazioni più volte richiamate nel corso delle analisi effettuate per la costruzione, taratura e verifica del modello.

Oltre alle tre onde così definite è stata utilizzata anche la forma d'onda adottata nel corso della progettazione dell'intervento per la verifica del funzionamento dello stesso (marea 4, Lamberti, 1998).

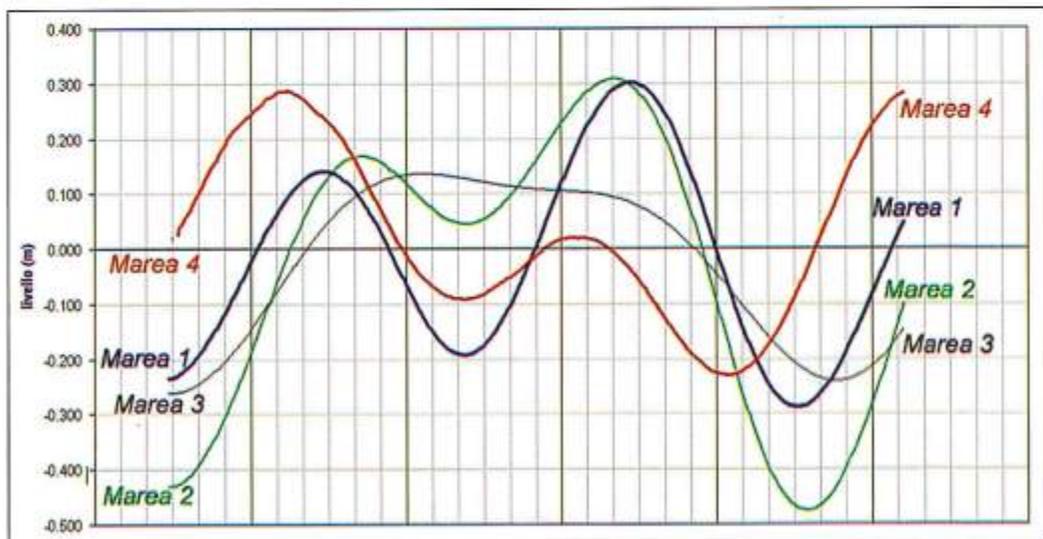


Figura 7 - Onde di marea tipiche utilizzate per le simulazioni idrodinamiche. Marea 1: mista diurna/semidiurna. Marea 2: semidiurna. Marea 3: diurna. Marea 4: onda mista utilizzata nella progettazione dell'intervento.

In tal modo è stato possibile effettuare una verifica del progetto in riferimento alle medesime con-

dizioni forzanti assunte nel calcolo idraulico.

## Risultati

### *Considerazioni sulla movimentazione delle acque*

Per valutare la circolazione idrodinamica all'interno della Sacca è stato analizzato il campo vettoriale del flusso (cioè della portata per unità di larghezza  $m^3/s/m$ ). Le Figure 8 e 9 si riferiscono alla Marea 1. La dinamica, qualitativamente, non varia significativamente per le diverse onde di marea esaminate. Il volume di marea entra attraverso le due bocche e si espande all'interno della Sacca, cosicché le portate unitarie diminuiscono man mano che ci si allontana dalle bocche.

Le zone di sofferenza si individuano, di conseguenza, nelle parti più distanti dalle bocche. I canali convogliano portate unitarie superiori a quelle delle zone a basso fondale, influenzando anche le zone limitrofe. Durante la fase discendente risulta evidente la portata scaricata verso l'esterno dalla paratoia a ventola, che in questa fase è aperta.

Per evidenziare in modo migliore la dinamica interna della Sacca in presenza della paratoia a ventola sono stati seguiti i percorsi di sei flottanti, per un periodo di cinque giorni, ottenuti replicando la Marea 1 (Fig. 10).

Si osserva che la paratoia a ventola funziona come sistema di risucchio per la parte Est della Sacca; si evidenzia infatti che nessuno dei flottanti esce dalla bocca secondaria, in quanto gli stessi vengono progressivamente spinti verso la struttura.

Solo il flottante che parte nei pressi di Gorino (coordinate E, N 6.8km, 4.5km in Figura 10) non risente di questo richiamo e oscilla sempre nella stessa zona.

### *Portate e volumi scaricati dalla paratoia a ventola*

Il dato di verifica più importante ottenuto con le simulazioni è la portata che attraversa la paratoia a ventola. È tale deflusso, infatti, che aumenta la circolazione ed il ricambio d'acqua nella zona orientale della Sacca. Le portate che attraversano la paratoia sono state calcolate per tutte e tre le maree caratteristiche e per quella di progetto.

Come è stato sopra osservato la paratoia risulta aperta durante le fasi di marea esterna decrescente. In riferimento alla Marea 1 la portata massima defluente è di circa  $50 m^3/s$ . Nella prima fase discendente il volume scaricato è di  $215.000 m^3$ , nella seconda, più pronunciata, il volume è di  $935.600 m^3$ , per un totale di  $1.150.600 m^3$  scaricati al giorno. La paratoia risulta aperta per 11 ore e 20 minuti nelle 24 ore considerate.

La Marea 2 presenta delle oscillazioni tipicamente semidiurne; l'escursione tra massimo e minimo è di circa 60 cm, inferiore alla precedente. Il volume giornaliero scaricato è in questo caso pari a  $1.231.700 m^3$ , leggermente superiore al caso precedente, come di poco superiore è anche il tempo di apertura della paratoia: 11 ore e 40 minuti.

La Marea 3, a differenza delle precedenti, presenta un solo periodo di apertura della paratoia durante il giorno, essendo la forma dell'onda prettamente diurna. Per questa forma di marea la paratoia rimane aperta per 15 ore e 40 minuti per un volume scaricato pari a  $657.300 m^3$ , con una portata massima di circa  $25 m^3/s$ . La particolare forma dell'onda, con un'escursione inferiore ai 30 cm, riduce notevolmente il volume rispetto ai due casi precedenti nonostante l'aumento del tempo di apertura della paratoia.

Nei tre casi analizzati, che rappresentano le maree che più frequentemente si presentano, si osserva una variazione dei volumi giornalieri scaricati da circa  $700.000 m^3$  a circa  $1.200.000 m^3$ . Se si considera una profondità media di 1 m per la parte orientale della Sacca, tali volumi corrispondono a delle superfici variabili da 70 ha a 120 ha nelle quali si attua un ricambio idrico completo in un giorno. Oltre alle tre onde tipiche, la valutazione dei volumi scaricati attraverso la paratoia è stata effettuata anche per l'onda di marea utilizzata per la redazione del progetto. In questo caso il volume scaricato verso l'esterno è pari a  $1.021.400 m^3$  in buon accordo con il valore di  $911.000 m^3$  assunto nel progetto.

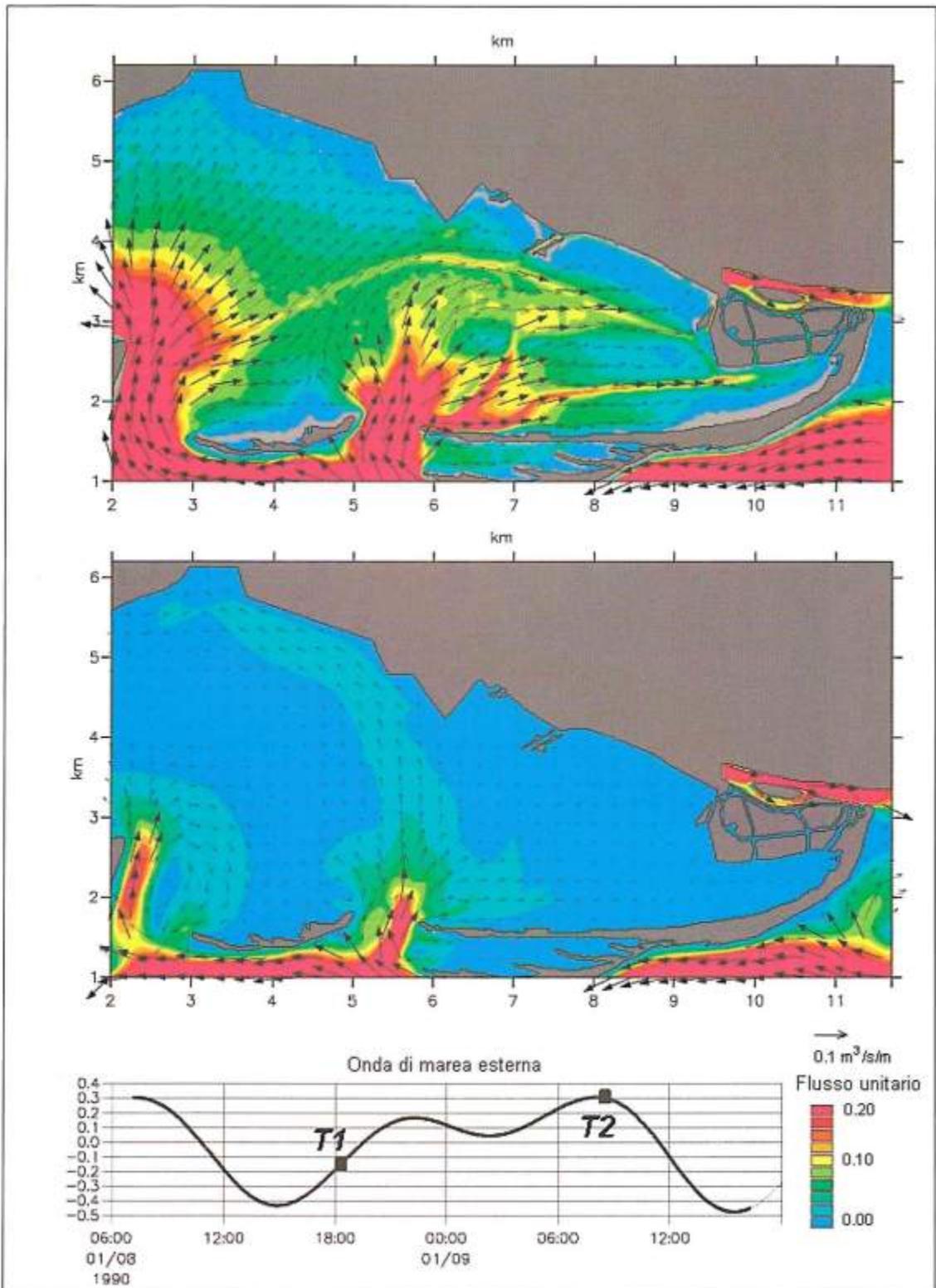


Figura 8 - Rappresentazione del campo di moto all'interno della Sacca di Goro in fase di marea crescente (T1) ed in fase di colmo di marea (T2). Si noti in T1 l'effetto del canale che convoglia le acque dalla bocca secondaria verso la zona interna della Sacca prossima alla foce del Po di Goro.

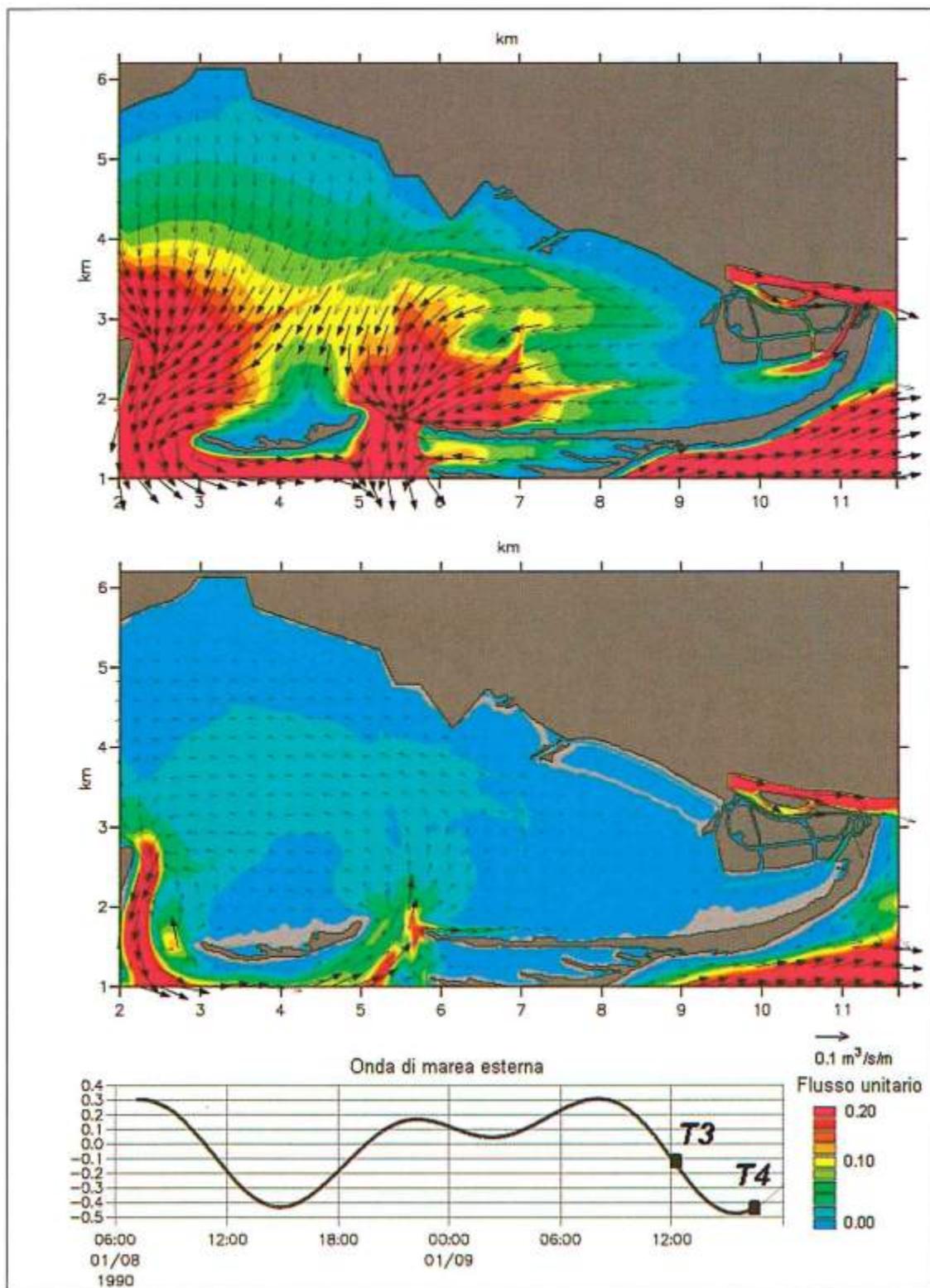


Figura 9 - Rappresentazione del campo di moto all'interno della Sacca di Goro in fase di marea calante (T3) ed in fase di cavo di marea (T4). In T3 la paratoia a ventola sul canale verso la Foce del Po di Goro è aperta e le acque interne della Sacca si scaricano verso l'esterno.

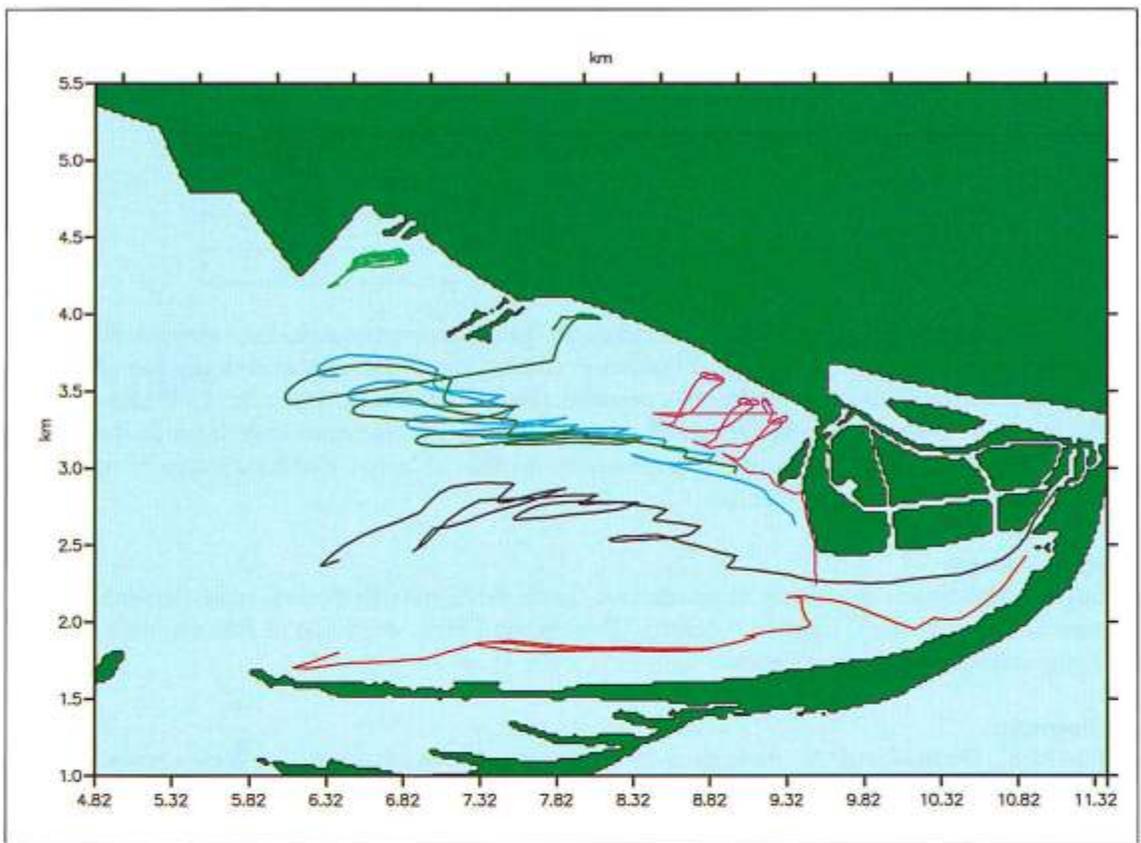


Figura 10 - Traiettorie di particelle flottanti nella Sacca per un periodo di 6 giorni con l'onda di marea 1.

#### Estensione dell'analisi di sensitività ai risultati dell'intervento

Per la taratura del modello è stato usato, come visto, il ritardo di marea tra Est e ovest, individuando un ritardo presumibile tra i 40 e i 60 minuti. Nelle valutazioni con le tre onde tipiche è stato utilizzato un ritardo di 40 minuti che è più cautelativo dal punto di vista dei volumi scaricati attraverso la struttura a ventola.

Per valutare qual è l'influenza di questo parametro sulle portate che vengono scaricate dalla Sacca verso l'esterno sono state effettuate le simulazioni per le tre onde tipiche di marea e per quella utilizzata nel progetto, anche per ritardi di 60 minuti. I volumi calcolati in questa situazione sono stati confrontati con quelli determinati per ritardo di 40 minuti, come rappresentato nella seguente tabella.

Come si vede solo per la Marea 3 la variazione è rilevante (24%). Per le altre maree l'incremento percentuale non è così accentuato e risulta contenuto all'interno del 16%. È quindi possibile che le portate che il sistema riesce a scaricare siano anche superiori, fino al 15-20% di quanto determinato in condizioni medie.

#### Conclusioni

Il modello matematico della Sacca di Goro ha consentito di verificare le ipotesi progettuali adottate per la realizzazione del nuovo sistema per la movimentazione naturale delle acque nella zona Est della Sacca. L'approccio bidimensionale, per quanto semplificato rispetto alla reale fenomenologia idrodinamica della Sacca che presenta flussi stratificati e miscelazione di acque dolci e salate, grazie ad una accurata operazione di taratura, è apparso idoneo alla rappresentazione degli effetti idraulici di più diretto interesse ingegneristico.

**Tabella 1 - Confronto tra i volumi scaricati dalla struttura per ipotesi di ritardo dell'onda di marea rispettivamente di 40 e 60 minuti lungo la frontiera Sud del modello.**

Marea	Volume scaricato m <sup>3</sup> (ritardo 40 min.)	Volume scaricato m <sup>3</sup> (ritardo 60 min.)	Var. %
1	1.150.600	1.324.100	15
2	1.231.700	1.425.000	16
3	657.300	817.100	24
4	1.021.400	1.170.700	15

Lo strumento di simulazione, del resto, fornisce un quadro di rappresentazione idrodinamico piuttosto dettagliato che potrebbe essere utilizzato in futuro come base conoscitiva per lo sviluppo di modelli più accurati basati su codici più avanzati (Danish Hydraulic Institute, 1998; Rasmussen, 1993), che consentano la simulazione tridimensionale del comportamento idrodinamico delle acque e l'analisi dei processi di trasporto-dispersione e di qualità dell'acqua che interessano in modo più diretto l'ecologia della Sacca di Goro.

### Ringraziamenti

Si ringrazia il Servizio Regionale di protezione Civile dell'Emilia Romagna, nella persona del Responsabile Ing. Demetrio Egidi, e il Servizio Provinciale Difesa del Suolo di Ferrara, nella persona del Responsabile Ing. Andrea Peretti.

### Bibliografia

- Abbot M.B., Damsagaard A., Rodenhuis G.S. (1973) - *System 21, Jupiter, A Design system for Two-Dimensional Nearly-Horizontal Flows*. Journal of Hydraulic Research, 1, 1973.
- Abbott M.B. (1979) - *Computational Hydraulics - Elements of the Theory of Free Surface Flows*. Pitman, London.
- Bazzi A. (1994) - *Tesi di Laurea. Le Pialasse di Ravenna. Studio generale sul funzionamento idraulico e sulle condizioni ambientali del sistema*. Relatore Prof. Gianni Luigi Bragadin. Università di Bologna.
- Danish Hydraulic Institute (1993) - *MIKE 21. Coastal Hydraulics and Oceanography. Hydrodynamic Module. Release 2.7. User Guide and Reference Manual*. Editore da DHI, Hoersholm, Denmark.
- Danish Hydraulic Institute (1998) - *MIKE 3. Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography. Hydrodynamic Module. Release 2.7. User Guide and Reference Manual*. Editore da DHI, Hoersholm, Denmark.
- Lamberti P. (1998) - *Opere di somma urgenza per la movimentazione naturale delle acque all'interno della Sacca di Goro. Progetto Esecutivo. Relazione Idraulica*. Amministrazione Provinciale di Ferrara.
- Rasmussen E.B. (1993) - *Three Dimensional Hydrodynamic Models*. In Abbott, M.B. and Price, N.A. (eds), *Coastal Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book*. Chapman and Hall, London.
- Regione Emilia Romagna (1999) - *Studio su modello matematico della circolazione idrica nella Sacca di Goro*. Servizio Provinciale Difesa del Suolo di Ferrara.
- Smagorinsky J. (1963) - *General Circulation Experiments with the Primitive Equations*. Monthly Weather Review, Vol. 91, pp.91-164.

Manoscritto ricevuto l'11/12/1999, accettato il 26/3/2000.

## Morfodinamica delle bocche lagunari della Sacca di Goro

Umberto Simeoni<sup>1</sup>, Giorgio Fontolan<sup>2</sup> e Paolo Ciavola<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara  
C.so Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine, Università di Trieste.  
Comprensorio S. Giovanni, Via Weiss, 2 - 34127 Trieste

### Riassunto

La Sacca di Goro è separata dal mare da una freccia litorale (Scanno di Goro) che prende origine in corrispondenza della foce del Po di Goro. Gli scambi idrici tra laguna e mare avvengono attraverso due bocche: la principale, delimitata ad ovest dal litorale di Volano, che costituisce l'unico accesso al mare per i natanti, e la secondaria, prossima alla foce del Po di Goro, sviluppatasi in pochi anni per il progressivo ampliamento di un piccolo canale d'origine antropica.

Attraverso lo studio di mappe storiche e di rilievi aereofotogrammetrici è stata documentata l'evoluzione secolare delle bocche di questa laguna. La naturale tendenza al protendimento verso ovest del sistema di scanni sabbiosi della freccia litorale, che tenderebbero a chiudere la laguna, è stata ben contrastata dalla forza mareale, che ha sempre mantenuto aperto uno sbocco in prossimità del litorale di Volano.

Lo studio condotto ha consentito di comprendere l'assetto morfodinamico del sistema delle bocche della Sacca, oggi fortemente influenzato dalle molteplici attività antropiche che si svolgono nell'area della laguna. L'analisi e l'interpretazione dei dati raccolti consentono altresì di avanzare credibili ipotesi sull'evoluzione, a breve termine, di queste bocche.

### Introduzione

Hayes (1975) fu il primo a riconoscere l'influenza che l'escursione di marea esercita sulla morfologia della bocca tidale e dei cordoni litoranei. Sulla base della classificazione proposta da Davies (1964), l'autore ha inoltre evidenziato come, in genere, i cordoni litorali microtidali siano lunghi, continui ed interrotti da poche bocche tidali, mentre in ambito mesotidale essi siano più corti e tozzi, con numerose bocche tidali. E' stata inoltre evidenziata (Fitzgerald, 1988) una corrispondenza fra l'area della baia e l'ampiezza delle bocche tidali: in coincidenza di retrobarriere con aree notevoli si trovano bocche più larghe, e viceversa.

Le bocche tidali interrompono il trasporto di sedimento indotto dalle correnti lungo costa, influenzando così sia l'apporto di sabbia ai lidi sottoflutto, sia i sistemi erosivi-deposizionali dei lidi adiacenti. Le bocche tidali non solo intrappolano la sabbia nei delta tidali, ma sono anche responsabili di perdite di sedimento perché trasportato nella laguna, oppure deposto nei canali progradanti della bocca. Questa sabbia non è restituita alla costa attiva fino alla trasgressione della linea di riva, che rende possibile l'erosione di questi depositi.

Hubbard (1977), Nummedal et al. (1977) ed Hubbard et al. (1979) schematizzarono un certo spettro di configurazioni per le bocche tidali: dominate dalla marea, dalle onde e con uguale dominio di maree ed onde. Nelle prime le correnti di marea sono molto forti, caratterizzate da un canale prin-

cipale profondo, e presentano un delta di riflusso di grandi dimensioni e di notevole estensione verso mare, mentre quello di flusso è, di solito, poco sviluppato o assente.

Nelle seconde il delta di riflusso è, generalmente, di modeste dimensioni, vista la prevalenza del *bypass* sulla sedimentazione, e spesso segmentato da numerosi canali di marea poco profondi. I delta di flusso, all'interno di lagune ampie ed aperte, sono invece ampi e multilobati.

Nell'ultima tipologia le onde e le maree presentano effetti circa uguali, e la maggior parte della sabbia transita in corrispondenza dell'imboccatura dell'apparato d'entrata della bocca. Le secche si sviluppano dunque in corrispondenza della bocca, oppure si estendono obliquamente verso mare da entrambi i lidi.

Certi sistemi di baia-bocca sono più stabili di altri, e mantengono la loro morfologia ed ubicazione per lungo tempo: è chiaro che le bocche di dimensioni maggiori e le entrate protette da moli sono più stabili di quelle più piccole e non protette. Diversi studi (O'Brien, 1931; Bruun e Gerritsen, 1961; Bruun e Battjes, 1963; Bruun, 1966; O'Brien, 1969; Jarrett, 1976) hanno proposto delle relazioni empiriche di stabilità di un *inlet* mettendo in relazione l'area della sezione trasversale della bocca con il prisma tidale in sизигie.

Esistono tre modalità attraverso le quali la sabbia si muove presso il *tidal inlet*: trasportata, lungo la periferia del delta di riflusso, dal moto ondoso dalle onde e, entro i canali, dalle correnti mareali oppure con la migrazione dei canali tidali e delle barre sabbiose.

Le bocche sono stabili quando il transito dei sedimenti avviene con la formazione, la migrazione verso terra e la saldatura al lido sottoflutto di grandi complessi di barre. Esse generalmente presentano un canale principale di riflusso che non migra. Se non è stabile si possono verificare due diverse situazioni (O'Brien e Dean, 1972; Bruun et al., 1974; Bruun, 1986):

- un ripascimento dei litorali sottoflutto alla bocca perché presentano una piccola capacità d'intercettazione e quindi non sottraggono grandi quantità di sedimento al trasporto lungo costa;
- sviluppo dei litorali limitrofi ed occlusione progressiva della bocca oppure migrazione della stessa quando l'*inlet* ha capacità d'intercettazione pari al trasporto litoraneo lungo costa.

### La Sacca di Goro

La laguna di Goro, ubicata nell'estremità meridionale dell'omonimo delta, si estende per oltre 20 km<sup>2</sup>, con profondità medie di 1,5 m, e racchiude un volume d'acqua di circa 40 Mm<sup>3</sup> (Fig. 1). È separata dal mare da una freccia litorale (Scanno di Goro) che prende origine in corrispondenza della foce del Po di Goro. Gli scambi idrici tra laguna e mare avvengono attraverso due bocche: la principale, occidentale, delimitata ad ovest dal litorale di Volano e la secondaria, orientale, più prossima alla foce del Po di Goro. La bocca occidentale costituisce l'unico accesso al mare per i natanti da pesca e da diporto che stazionano nel porto di Goro, anche se, per mantenere un battente d'acqua sufficiente al passaggio delle imbarcazioni, vengono effettuati periodici dragaggi. Quella secondaria, sviluppatasi nell'ultimo decennio per l'ampliamento operato dal mare di un piccolo canale d'origine antropica, è caratterizzata da bassi fondali che consentono l'accesso solo a piccole imbarcazioni, con fondo piatto, utilizzate per la pesca delle vongole.

I valori di marea nella Sacca variano da - 40 cm ad un massimo di + 80 cm. L'innalzamento dal livello medio mare supera quest'ultimo valore (+ 1,5 m con un periodo di ritorno annuale) in momenti particolari (fenomeno dell'acqua alta) per effetto congiunto del *set-up* da onda, ingorgo causato dal vento e marea astronomica.

Per la protezione offerta dalla prominente del Delta, le onde che investono la Sacca hanno altezze molto ridotte (*H* media ~50 cm) ed una provenienza compresa tra i 60° ed i 120°. Le direzioni di trasporto dei materiali, determinate dalla prevalenza dei mari di Scirocco e di Levante, assumono direzioni convergenti verso la Sacca (Dal Cin, 1983; Simeoni et al., 1998). Essa, dunque, alimentata dalla correnti lungo riva che risalgono il litorale emiliano-romagnolo e discendono il Delta, esercita

una funzione di "trappola sedimentaria", presentando così, anche nei periodi di maggior deficit sedimentario del Po, un bilancio dei materiali in attivo.

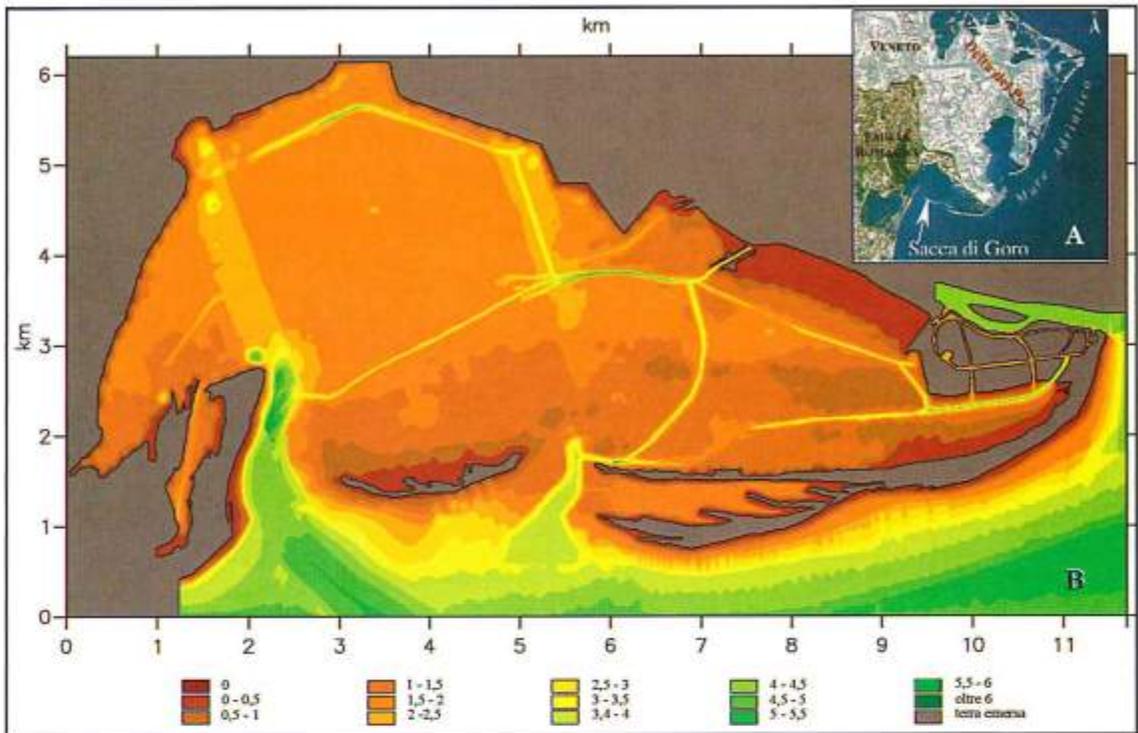


Figura 1 - Localizzazione (A) e batimetria (B) della Sacca di Goro (rilievi del 1999).

### Evoluzione storica delle bocche lagunari

Agli inizi del XX secolo la laguna di Goro era separata dal mare da due frecce litorali ben sviluppate, la più interna delle quali dava origine alla Sacca dell'Abate o Rada di Goro. Gli scambi d'acqua con il mare avvenivano attraverso una bocca principale, posta a ridosso del litorale di Volano, ed ad alcune piccole rotte dello Scanno. Nel 1934 la laguna era separata dal mare da un sistema freccia litorale-isola di Piallazza, che dava origine a due bocche lagunari: la più piccola (quella orientale) larga circa 1200 m e l'altra (la principale), che confinava con la spiaggia di Volano, ampia circa 2400 m.



Figura 2 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1949 (particolare dello Scanno di Goro).

Il rilievo successivo, effettuato dopo circa quindici anni (Fig. 2), evidenzia un'area dello Scanno molto articolata, caratterizzata dalla presenza di ben cinque lineamenti morfologici, parzialmente affioranti, riconducibili ad altrettante frecce litorali. Il sistema scanni-isole del 1949 era molto frammentato da una serie di rotte e di piccoli canali di marea molto articolati. Le due bocche rilevate nel 1934 risultano ben evidenti: la principale più estesa e caratterizzata da maggiori profondità del canale e quella secondaria con morfologie tidali ben sviluppate e fondali generalmente poco profondi. E' interessante notare come il compreso tra il 1934 ed il 1949 sia stato caratterizzato da elevate portate liquide del Po (1517 m<sup>3</sup>/sec di portata media), che però mostrano una tendenza alla riduzione dei valori medi, soprattutto nel periodo 1942-45.



Figura 3 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1955 (particolare dello Scanno di Goro).

Nei sei anni successivi (1950-55) le portate medie calano sensibilmente (1363 m<sup>3</sup>/sec), anche se nel 1951 vi è da registrare un evento di piena particolarmente intenso (9000 m<sup>3</sup>/sec). In questi anni lo Scanno si è ulteriormente allungato (Fig. 3), i varchi tra le varie isole si sono saldati e la laguna presenta un interrimento diffuso. L'aspetto morfologico più rilevante è dato dalla scomparsa dell'isola della Piallazza, sostituita da un'estesa piana di marea che occlude quasi tutta la bocca lagunare. Lo scambio delle acque avviene attraverso lo stretto canale della bocca di Volano ed i numerosi canali di piccole dimensioni che segnano la piana di marea. E' interessante notare come la bocca principale, quella delimitata dal litorale occidentale di Volano, tra il 1934 ed il 1955 si sia ristretta di circa 600 m, passando da un'ampiezza di 2430 m a 1830 m.

Lo Scanno continua ad allungarsi anche nei nove anni successivi, fino a raggiungere nel 1964 i 6,7 km di lunghezza. Ciò è in parte da collegare all'incremento delle portate liquide del Po (portata media di 1542 m<sup>3</sup>/sec) registrato in questo periodo. Tra il 1964 ed il 1970 la riduzione della portata liquida media del Po (1357 m<sup>3</sup>/sec) e la sottrazione di materiale per effetto della subsidenza e dei prelievi d'inerti dalle cave in alveo determina un arresto della crescita dello Scanno e una sua riduzione di circa 500 m. Nel quinquennio successivo (1971-76) si registra un incremento della portata liquida (1577 m<sup>3</sup>/sec), anche si sviluppano intensi fenomeni erosivi nell'area di foce del Po di Goro. Questi arretramenti favoriscono lo smantellamento di un tratto della freccia litorale, che si trova così separata dall'area di foce da un canale ampio 100 m. Il fotomosaico del 1977 (Fig. 4) mette in rilievo come l'unitarietà della bocca Volano, ampia circa 2 km, fosse interrotta da un'isoletta (lunga circa 430 m). L'estremità orientale di quest'ultima delimita una piccola bocca secondaria, ampia circa 120 m. La crisi interessa anche la crescita dello Scanno, la cui lunghezza si riduce a circa 6 km, ed i fondali interni della laguna che risultano più approfonditi, anche perché meno protetti per lo smantellamento della grande piana tidale che caratterizzava il rilievo del 1955.

Tra il 1977 ed il 1979 perdura la fase regressiva dello Scanno, anche se aumenta la portata liquida media del Po (2088 m<sup>3</sup>/sec). L'area dello Scanno si assottiglia notevolmente ed assume una forma molto rettilinea. La bocca principale, di Volano, si allarga (Fig. 5) raggiungendo una dimensione di circa 2,6 km, soprattutto per lo smantellamento dell'isoletta presente nel 1977. Alla fine degli anni

'70 per salvaguardare l'unitarietà dello Scanno, vengono messe in opera alcune strutture di difesa (tubi Longard), la prima delle quali fu costruita per chiudere un varco apertosi nello Scanno ("rotta dello Ancon").



Figura 4 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1977 (particolare dello Scanno di Goro).

Tra il 1977 ed il 1979 perdura la fase regressiva dello Scanno, anche se aumenta la portata liquida media del Po (2088 m<sup>3</sup>/sec). L'area dello Scanno si assottiglia notevolmente ed assume una forma molto rettilinea. La bocca principale, di Volano, si allarga (Fig. 5) raggiungendo una dimensione di circa 2,6 km, soprattutto per lo smantellamento dell'isoletta presente nel 1977. Alla fine degli anni '70 per salvaguardare l'unitarietà dello Scanno, vengono messe in opera alcune strutture di difesa (tubi Longard), la prima delle quali fu costruita per chiudere un varco apertosi nello Scanno ("rotta dello Ancon").

Nei tre anni successivi la lunghezza dello Scanno rimane quasi invariata e così pure l'ampiezza della bocca principale (2580 m). In questo periodo le portate liquide medie del Po diminuiscono (1563 m<sup>3</sup>/sec) e così pure tra il 1983-89 (1487 m<sup>3</sup>/sec) fino ad attestarsi attorno ai 1024 m<sup>3</sup>/sec nel 1991.



Figura 5 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1980 (particolare dello Scanno di Goro).



Figura 6 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1986 (particolare dello Scanno di Goro).

La tendenza alla frammentazione della freccia litorale viene in parte accentuata dall'apertura antropica, nel tratto centrale, di un varco che innesca la definitiva evoluzione del sistema dello Scanno in un sistema scanno-isola barriera.

Nel fotomosaico del 1986 (Fig. 6) si nota un evidente canale di marea nella bocca secondaria ed un'estesa piattaforma sommersa, nella parte terminale del sistema scanno-isola. Pur frammentato, la sua estremità occidentale ha continuato ad allungarsi verso il litorale di Volano anche negli anni successivi, tanto che l'ampiezza della bocca principale passa da 1900 m nel 1989 a 1500 m nel 1991 (Fig. 7).

Un successivo varco aperto abusivamente, ben visibile nel fotomosaico del 1993 (Fig. 8), rende sempre più evidente la separazione in atto tra lo Scanno e l'isola. In quest'ultimo oramai si è strutturato un ben delimitato canale di marea, alle cui estremità s'intravedono i delta di flusso e riflusso. Mentre si sta sviluppando questa bocca secondaria, quella di Volano (principale) riduce sempre di più l'ampiezza della sua sezione (circa 1200 m).



Figura 7 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1991 (particolare dello Scanno di Goro).



Figura 8 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1993 (particolare dello Scanno di Goro).



Figura 9 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1996 (particolare dello Scanno di Goro).

Nei tre anni successivi (Fig. 9) la bocca secondaria si sviluppa notevolmente, raggiungendo un'ampiezza di circa 860 m. Essa oramai presenta le tipiche morfologie di una bocca attiva, con ben evidenti delta di flusso e di riflusso, anche se quest'ultimo è meno accentuato. Il protendimento dell'isola verso la spiaggia di Volano continua riducendo ulteriormente l'ampiezza della bocca principale (circa 930 m).

### Assetto morfodinamico delle attuali bocche lagunari

#### *Morfologia dei fondali*

Numerose barre, prevalentemente rettilinee, e piccole pendenze (0,75 % tra 0 e -3 m) caratterizzano i fondali tra la bocca secondaria e la foce del Po di Goro; a ridosso di quest'ultima le pendenze si attenuano (0,45%) e le barre sono meno continue, più arcuate e festonate. Procedendo verso ovest (Fig. 1), l'isobata di -3 m si allontana da riva (pendenza media dei fondali di 0,3 %) e non presenta particolari distorsioni in corrispondenza dei canali di marea.

La costa di Volano è contraddistinta da una serie di frecce e di banchi sabbiosi allungati in direzione nord-est (Fig. 10), determinati dall'effetto della deformazione del moto ondoso esercitata dall'estremità dello Scanno.



Figura 10 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1997 (particolare dello Scanno di Goro).

L'apice settentrionale del litorale presenta delle evidenti uncinature di crescita, originate dall'azione combinata dei vettori della corrente tidale e del trasporto lungo costa che, entrando in laguna, si aprono a ventaglio.

La batimetrica della bocca principale (Fig. 11) mette in evidenza come il canale, che si sviluppa con asse parallelo alla spiaggia di Volano, presenti, in corrispondenza della parte terminale dello Scanno ed in corrispondenza delle massime profondità, una debole curvatura verso nord-nord-est. Questo canale di marea è poco ampio e relativamente profondo, con sponde asimmetriche e discretamente ripide (pendenza di 1:10 nel lato occidentale e 1:50 in quello orientale). Alle sue estremità i fondali degradano dolcemente verso profondità minori. L'andamento delle batimetriche 2 e 2,5 m nell'area interna della bocca evidenzia una rampa morfologica, lungo la quale risale la massa d'acqua legata al flusso di marea crescente.

L'ampia zona a basso fondale antistante la propaggine occidentale dello Scanno, ben definita dall'andamento della batimetrica -2,5 m, costituisce il sistema sommerso della crescita della freccia litorale. Su questa piattaforma si sviluppano delle barre lineari di margine di canale, originate dagli effetti dell'interazione tra il moto ondoso e la corrente tidale, ed un canale marginale di marea, con profondità comprese fra 2,1 e 2,3 m, entro cui si confina parte della corrente di flusso. L'evidente protendimento in mare del canale mette in rilievo come nella bocca vi sia una prevalenza della componente di riflusso rispetto a quella di flusso e come dopo i - 3 m prevalgono, nei depositi e nella movimentazione dei materiali, processi prettamente marini.

Gli elementi morfologici tipici di una bocca lagunare sono invece ben sviluppati in quella secondaria (Fig. 11), delimitata ad est da uno scanno biforcuto. L'area compresa tra le due sfrangiature di

quest'ultimo è costituita da piane tidali, banchi sabbiosi intertidali e sommersi (subtidali). La sfrangiatura più esterna (verso mare) è circondata da una piattaforma allungata, che si rialza verso il centro fino a costituire banchi sabbiosi intertidali.

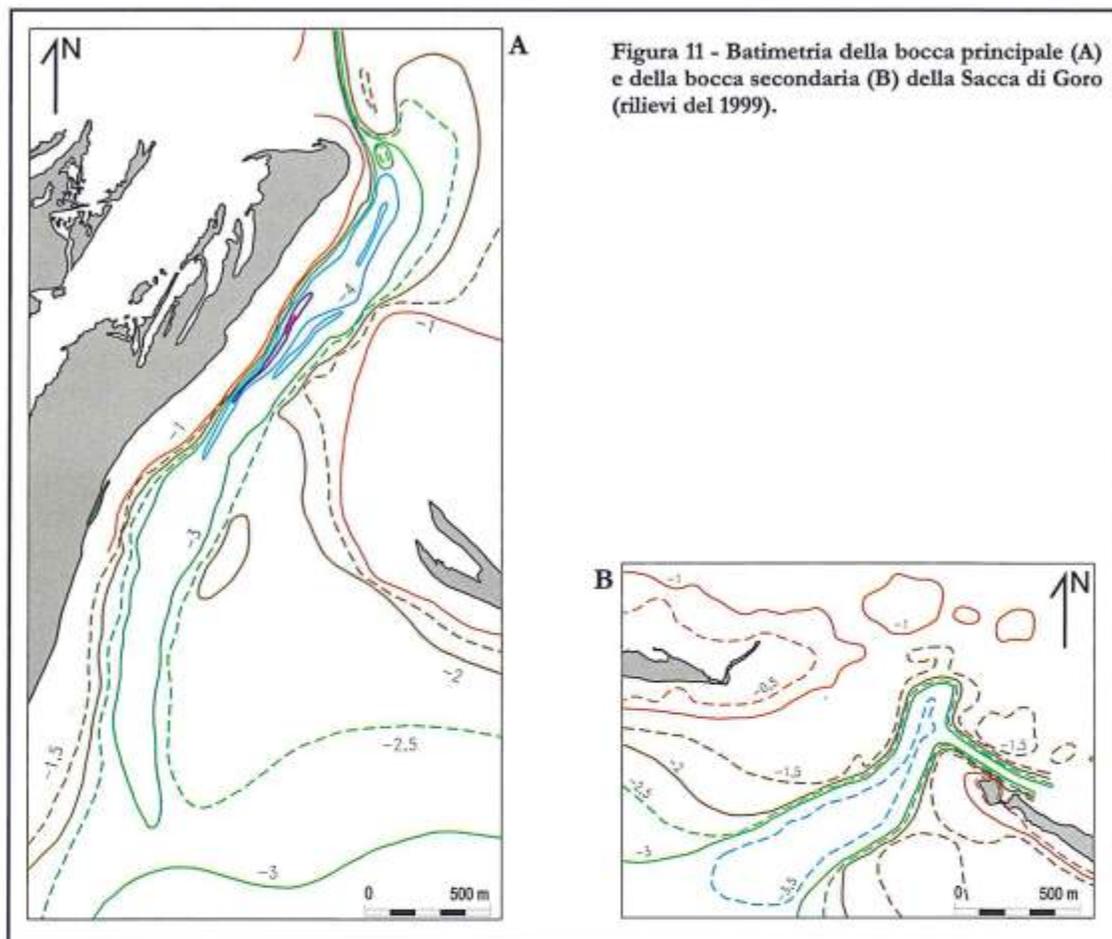


Figura 11 - Batimetria della bocca principale (A) e della bocca secondaria (B) della Sacca di Goro (rilievi del 1999).

La bocca presenta un gran numero di lobi di *spillover*, i più orientali dei quali, ubicati in corrispondenza del varco di un impianto idrovoro, sono presumibilmente fossili. Gli ampi e ben sviluppati lobi evidenziano un completo ed articolato processo d'espansione della massa d'acqua montante all'interno della laguna. La presenza di una fitta rete di canali, non sempre ben distinguibili, sulla piana tidale ed una rampa di flusso ben sviluppata caratterizzano la zona interna della bocca. Sul lato mare della sponda occidentale vi è un'estesa barra lineare di margine di canale, mentre il lato orientale, in corrispondenza della batimetria  $-2,5$  m, si rilevano numerose *swash bars*, con forma lunata, costruite dal moto ondoso.

#### **Caratteristiche dei sedimenti**

Nei fondali antistanti lo Scanno e la bocca del Po di Goro la distribuzione della percentuale della sabbia è assai articolata (Fig. 12). I sedimenti con un contenuto in sabbia maggiore del 95 % sono distribuiti lungo una stretta fascia prossima a riva. E' assai interessante notare com'essa si amplii in corrispondenza della bocca nuova, per effetto delle correnti di marea, e della parte centrale dello scanno. Quest'ultima potrebbe essere sintomatica della crescita di una nuova geminazione: l'accumulo di sabbia rappresenterebbe l'embrione della piattaforma sommersa di una nuova ge-

minazione. Questi sedimenti caratterizzano oltre che la fascia costiera della freccia litorale e di Volano, anche i due fianchi del canale della bocca principale.

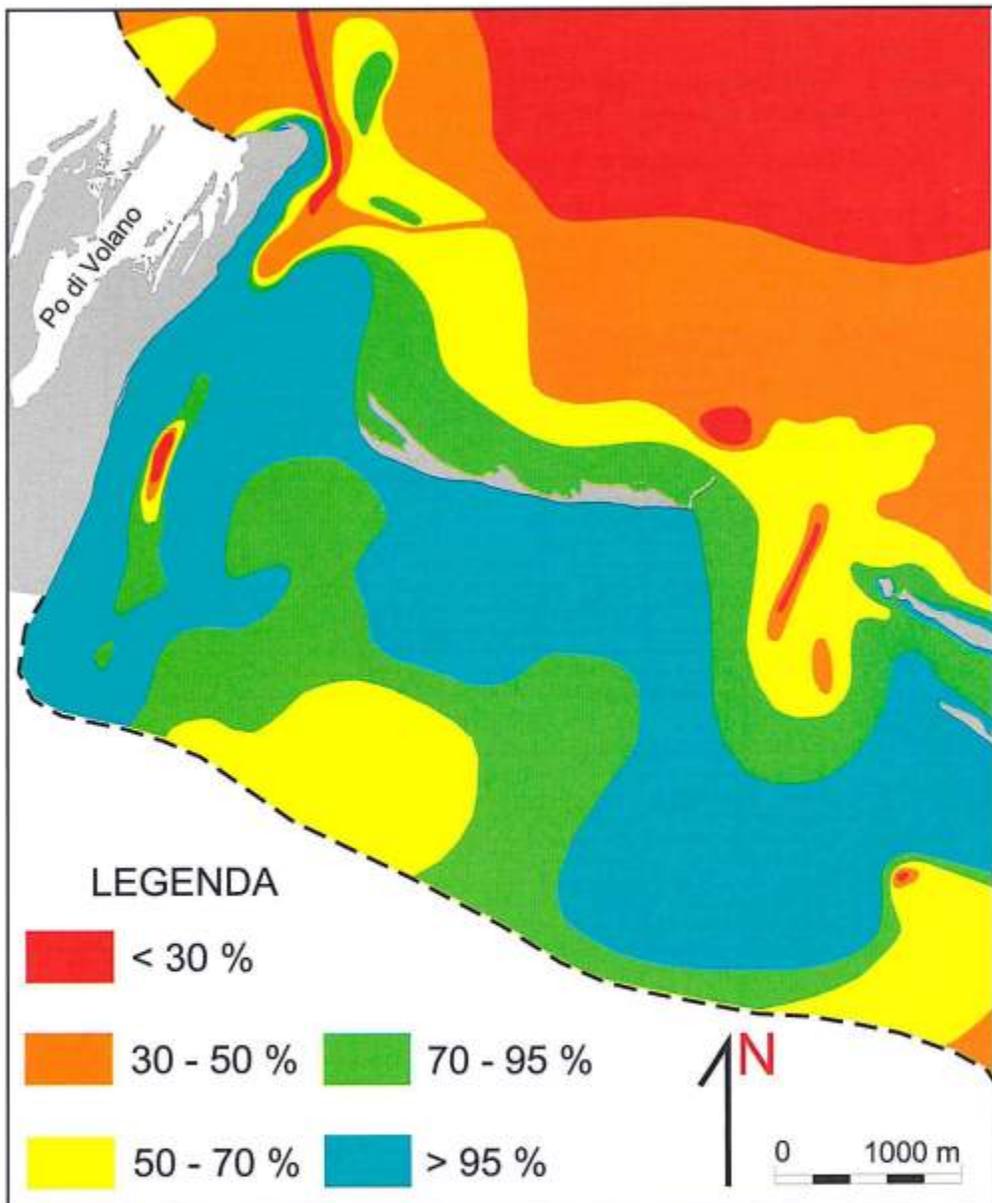


Figura 12 - Distribuzione della percentuale di sabbia sui fondali delle bocche lagunari della Sacca di Goro.

Le sabbie pelitiche ( $95\% < \text{sabbia} < 70\%$ ) sono distribuite in prevalenza nell'area di transizione tra il sistema bocche-freccia litorale e quello prettamente marino: segnano quindi il passaggio verso granulometrie più fini, caratteristiche degli ambienti meno energetici. Il graduale passaggio dimensionale verso sedimenti più sottili (da sabbia a sabbia pelitica, a pelite molto sabbiosa) evidenzia, nell'estremità settentrionali dei canali lagunari, l'area di transizione che caratterizza la parte interna di un bacino lagunare. Queste modalità deposizionali, ad esempio riduzione della percentuale di sabbia procedendo dalla sponda verso il centro del canale, non sono rispettate in una limitata zona per una commistione tra sedimenti relitti ed attuali, a causa di una sovraescavazione da parte della

corrente tidale oppure per la deposizione di sedimenti fini risospesi in aree limitrofe. Il ritrovamento di peliti sabbiose, a breve distanza, avvalorò questa seconda ipotesi: da quest'area torbide ad alta densità, mobilitate dalle attività di pesca, si spostano in direzione del canale per poi sprofondare verso le massime depressioni, dove le correnti tidali subiscono repentini decrementi. La profondità del canale, le basse velocità di corrente e la maggiore densità della massa d'acqua impediscono gli scambi verticali e la ridistribuzione laterale, favorendo la sedimentazione sia delle sabbie, che transitano lungo il canale, sia di un fango idrato e poco compatto.

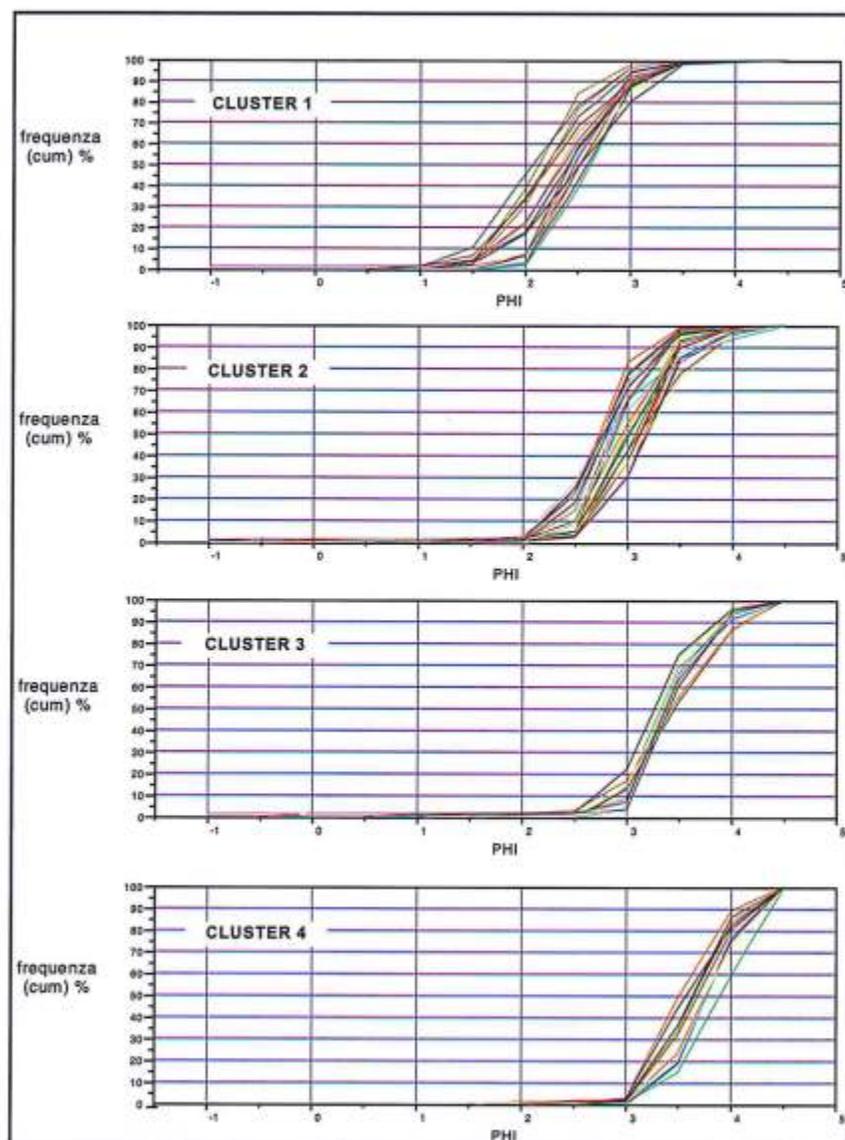


Figura 13 - Fusi dimensionali dei quattro raggruppamenti del cluster.

Rispetto allo studio condotto da Dal Cin e Pambianchi (1988), l'area dell'imboccatura principale della Sacca presenta quindi una distribuzione della frazione sabbiosa meno omogenea, forse per il maggior dettaglio di campionamento (16 campioni contro 105) o per il cambiamento delle caratteristiche morfo ed idrodinamiche dell'imboccatura. Evidenti sono ad esempio i due depositi di sabbie pelitiche ubicati alle due estremità della bocca principale: quello di forma lobata dell'imboccatura

interna che delimita la rampa di flusso e quello dell'imboccatura meridionale probabilmente dovuto al mescolamento tra sedimenti attuali ed antichi depositi di margine di canale o di piana, messi a giorno dai periodici dragaggi effettuati in quest'area.

Per meglio discriminare l'area della bocca principale, più articolata di quella secondaria, è stata utilizzata una procedura di *cluster analysis* su di una matrice di 106 campioni descritti da 12 campi dimensionali. Essa ha consentito di evidenziare quattro raggruppamenti a livello di distanza pari a  $1-r=0,4$ . Il parametro discriminante è risultato il diametro medio ( $Mz$ ), mentre i valori di classazione, asimmetria ed appuntimento non consentono significative distinzioni. Le caratteristiche dei raggruppamenti possono essere così schematizzate (Fig. 13):

*Cluster 1* (Cl.1). Presenta un  $Mz$  distintivo di  $2.45 \pm 0.18 \phi$ ; analizzando la distribuzione di frequenza dei campioni appartenenti a questo gruppo, si è visto che il loro diametro modale può variare da 2.0 a 3.0  $\phi$ , mantenendo però un centroide di 2.5  $\phi$ .

*Cluster 2* (Cl. 2). Il diametro medio del cluster è di  $2.97 \pm 0.13 \phi$ ; il centroide del gruppo, osservando la distribuzione delle mode, è pari a 3.0  $\phi$ , con variazioni laterali da 2.5 a 3.5  $\phi$ .

*Cluster 3* (Cl. 3). L' $Mz$  del cluster risulta di  $3.41 \pm 0.06 \phi$  ed è incentrato su distribuzioni asimmetriche positive, con mode comprese tra 3.5 e 4.0  $\phi$ .

*Cluster 4* (Cl. 4). Il diametro medio del raggruppamento è di  $3.65 \pm 0.10 \phi$ , ma tra i campioni si sono riscontrate variazioni modali da 3.5 a 4.5  $\phi$ , con centroide pari a 4.0  $\phi$ ; in questo caso prevale un'asimmetria negativa.

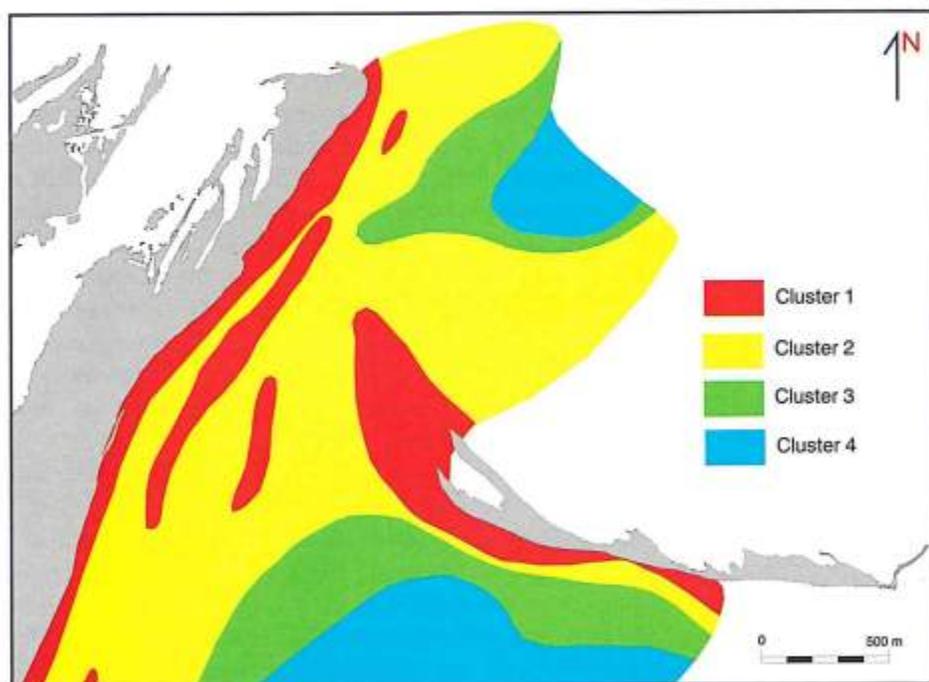


Figura 14 - Distribuzione areale dei cluster nella bocca principale (occidentale) della Sacca di Goro.

Il calo del diametro medio non è costante nel passaggio da un cluster al successivo (Fig. 14), ciò potrebbe essere indicativo di diverse differenze energetiche tra aree contigue, discriminate dai raggruppamenti. I fusi, ben confinati, delle curve cumulative log-lineari dei campioni appartenenti a ciascun cluster forniscono un'ulteriore conferma della buona definizione dimensionale delle popolazioni discriminate con questo metodo. Infine il confronto tra i valori, relativi ai campioni dei quattro raggruppamenti, del diametro medio con la classazione e l'asimmetria, e tra questi ultimi due pa-

rametri statistici confermano il valore discriminante del solo Mz, forse per l'elevata capacità selettiva dell'ambiente studiato.

### ***Schema morfodinamico del sistema Scanno-bocche lagunari***

Lo studio degli apparati tidali è notevolmente complicato dalla rapidità con cui essi modificano la loro conformazione per adattarsi a nuove condizioni, seppur poco diverse, degli input. La figura 15 propone uno schema morfodinamico delle bocche lagunari di Goro nel quale sono riunite informazioni derivate dai diversi studi di settore (evolutivo, morfologico, idraulico e sedimentologico) svolti nell'area. La terminologia utilizzata per distinguere le forme presenti ricalca quella proposta da Hayes (1980).

Dalla conformazione del canale di marea, dal tipo d'elementi morfologici isolati e dalla loro posizione relativa, si può dedurre che la corrente tidale influenza fortemente la morfologia complessiva della bocca principale della Sacca di Goro. In quest'area il moto ondoso dominante non assume valori energetici di rilievo, sebbene si presenti quasi sempre con componenti *longshore* dirette verso ovest, per rifrazione determinata dalla falcatura del lobo meridionale del Delta. La naturale tendenza allo sviluppo longitudinale del sistema di scanni sabbiosi della freccia litorale è ben contrastata dalla forza mareale ed il moto ondoso non sembra influire direttamente sulla bocca. Viceversa la sua azione è determinante per la modellazione dei litorali adiacenti, in modo particolare quello occidentale di Volano. Poiché le simulazioni numeriche hanno evidenziato la difficoltà del moto ondoso di superare la soglia della Sacca, le morfologie interne vanno attribuite all'azione di redistribuzione dei sedimenti da parte del flusso di marea.

La corrente di marea crescente risulta confinata nella porzione occidentale del canale principale, per la spinta esercitata dalla crescita dello Scanno. In corrispondenza della terminazione interna del canale principale si individua una «zona d'ombra», risultato del moto circolatorio che si innesca quando il getto della corrente tidale entra nella laguna, dopo aver percorso lo stretto canale.

La bocca lagunare occidentale mostra dunque i tipici elementi di un *inlet* dominato dalle maree. In particolare, la presenza di un canale principale profondo e ben sviluppato longitudinalmente e di una barra lineare al margine del canale, che fiancheggia il canale principale, nonché il protendimento verso Sud dell'estremità della piattaforma di *spiit*, parrebbero invocare un prevalente processo di costruzione di un *ebb-delta*, in parte contrastato dall'azione del moto ondoso. Va infine segnalato che, malgrado molte morfologie siano oggi completamente obliterate dall'incessante attività di pesca, il lato lagunare del canale conserva una depressione riconducibile ad una rampa di flusso, che invoca la formazione di un *flood-delta*, sicuramente presente, anche con forme lobate, fino al 1955, come risulta dalla documentazione aerofotogrammetrica.

Sulla base delle misure di correntometriche (Simeoni et al., 1998) e delle caratteristiche batimetriche del canale appare evidente come la bocca principale canalizzi facilmente il flusso di marea. Essa presenta un flusso tipicamente bidirezionale, con valori simili sia in fase di flusso sia di riflusso. Le massime velocità registrate, da un correntometro ubicato in prossimità della bocca interna e sollevato di 1 m dal fondo, sono state di circa 0,4 m/sec. I dati raccolti e le simulazioni matematiche effettuate lasciano intuire l'importanza del moto ondoso e di correnti generate dal vento nel determinare una circolazione secondaria alquanto variabile ed una tendenza alla sovraescavazione del canale. La conformazione della bocca secondaria, il delta di riflusso di modeste dimensioni e di flusso ampio e multilobato, il canale piccolo e poco profondo (circa -2 m) porta a classificare questa apertura come una bocca dominata dalle onde. Questa configurazione rispecchia la storia stessa del varco che, aperto abusivamente alla fine degli anni '80, in poco tempo è stato progressivamente ampliato dall'azione del mare. Nella sua piattaforma è ben sviluppato il rialzo morfologico della barra lineare di margine di canale che caratterizza la sezione di bocca dove le correnti di riflusso sono d'entità paragonabile a quelle di flusso. Ciò conferisce alla bocca orientale una configurazione più simmetrica, consentendo al getto di marea di mantenersi uniassiale anche nell'area di potenziale espansione.

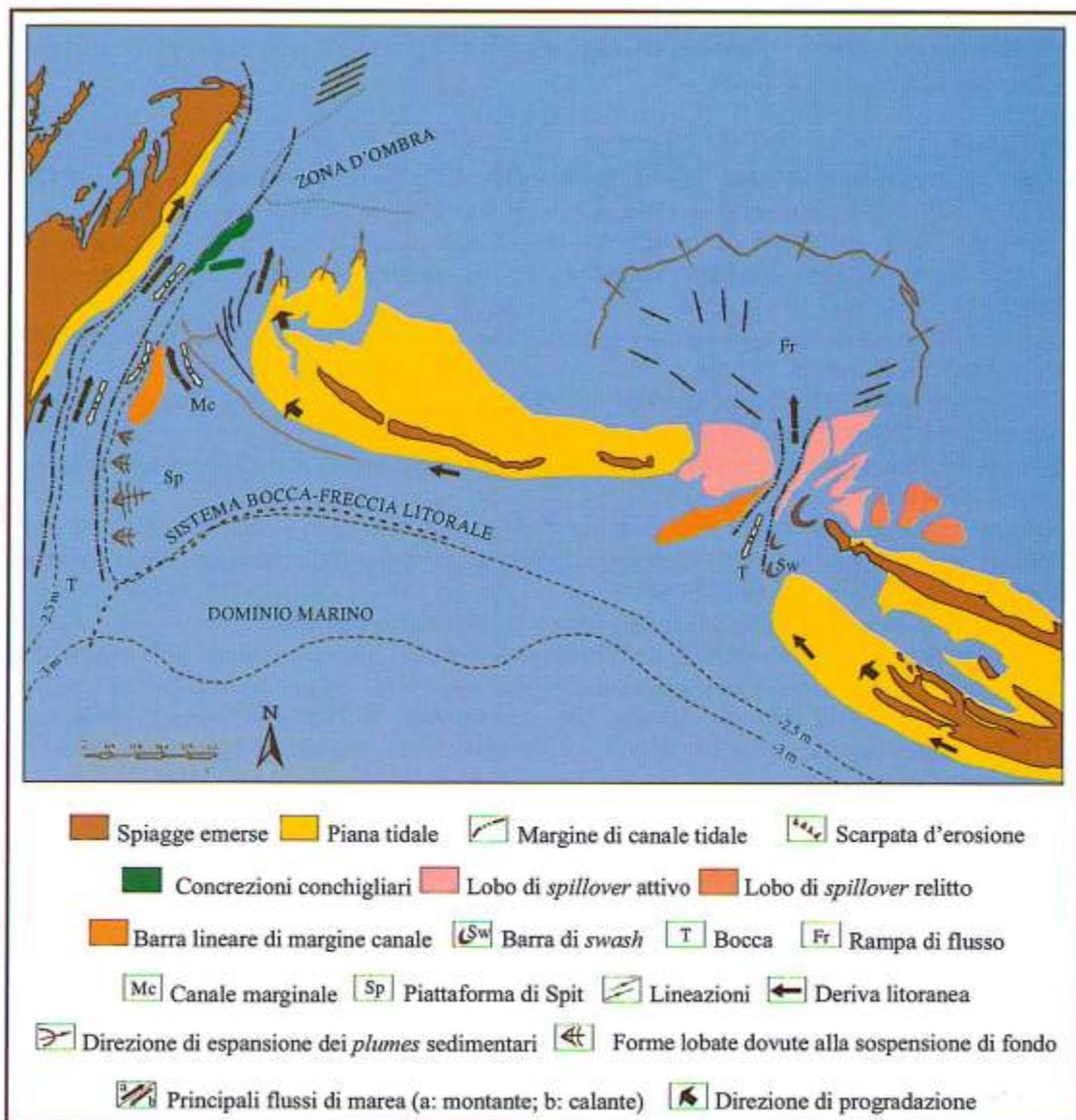


Figura 15 - Schema morfodinamico delle bocche lagunari della Sacca di Goro.

Ad ovest di questa bocca il cordone litorale presenta una piccola interruzione tra il sistema di banchi sabbiosi, intertidali e sommersi, per la presenza di una piccola rotta di tempesta, ora risaldatasi. Alle spalle dello Scanno si possono evidenziare dei cordoni sabbiosi fossili, parzialmente sommersi, che testimoniano una sua precedente posizione. L'estrema dinamicità dell'area è messa in risalto dal confronto della linea di riva del 1986 con il profilo interno della freccia del 1994, che è rimasta sostanzialmente invariata sino ad oggi.

Le misure effettuate nel mese di giugno del 1999, in condizioni di sizigie e con un battente d'acqua compreso tra 1,7-2,6 m, con uno strumento posto a 0,5 m dal fondo, hanno rilevato velocità massime di flusso di 0,4 m/sec e 0,28 m/sec di riflusso. I dati correntometrici e la morfologia dei fondali suggeriscono com'essa sia dominata dal flusso di marea entrante.

L'energia della corrente tidale opera prevalentemente entro i canali principali di entrambe le bocche, mentre quello marginale della bocca principale svolge una funzione secondaria e periferica.

L'influenza del sistema bocche-freccia litorale si attenua notevolmente sui fondali compresi tra il limite della sua piattaforma e l'isobata  $-3$  m, dove iniziano a prevalere sedimenti la cui componente sabbiosa presenta mode di  $4 \phi$ .

### Conclusioni

L'analisi storica condotta ha messo in evidenza come l'evoluzione delle bocche della laguna di Goro abbia presentato modalità e tempi d'evoluzione assai differenti, in accordo con quanto riscontrato da Barnard e Davis (1999) nei sistemi d'isole-barriera della baia di Tampa, lungo la costa centrale della Florida. Lo studio condotto ha consentito di evidenziare alcuni punti fondamentali dell'evoluzione delle bocche in esame:

- lo scambio d'acqua tra mare e laguna ha sempre avuto come via preferenziale la bocca delimitata ad occidente dal litorale di Volano;
- la sua sezione varia nel tempo in funzione dell'allungamento, verso ovest, della freccia litorale che è alimentata dall'arrivo di materiali sabbiosi provenienti dal Po;
- il progressivo restringimento della bocca è parzialmente compensato da un progressivo approfondimento del canale;
- il precario equilibrio tra la spinta di crescita della piattaforma della freccia litorale e le masse d'acqua, che transitano nel canale della bocca, viene successivamente modificato per la frammentazione e lo smantellamento dello Scanno;
- ciò da inizio ad una nuova fase del sistema freccia litorale-bocca lagunare.

Questo schema evolutivo, che individua nella bocca di Volano l'apertura naturale della laguna, è essenzialmente determinato dalla direzione delle correnti lungo riva, una che risale il litorale emiliano-romagnolo e l'altra che discende dal Po, che convergono, tra loro quasi ortogonalmente, in quest'area. Non è stato possibile riscontrare in letteratura simili direzioni di trasporto, a meno che si raffronti la Sacca di Goro con aree di estuario (Johnsen et al., 1999; McBride, 1999).

Queste direttrici trasformano la Sacca di Goro in una trappola sedimentaria: ciò determina un continuo innalzamento dei fondali interni della laguna. Se quest'ultima tendenza non fosse stata compensata dall'innalzamento del livello del mare, dalla forte subsidenza dell'area e da una riduzione degli apporti sabbiosi del Po l'esistenza della Sacca di Goro sarebbe stata posta in essere più che dalla chiusura della bocca di Volano da un continuo e progressivo interrimento dei suoi fondali.

I dati sull'attuale dinamica morfo ed idrosedimentaria suggeriscono come oggi l'efficienza della bocca principale sia minore di quella del sistema dello Scanno: ciò fa sì che essa non riesca a contrastare efficacemente il suo protendimento verso occidente. Solo un'ulteriore riduzione della sezione di bocca, con un conseguente incremento delle velocità e di competenza della corrente tidale, potrà permettere una ridistribuzione delle sabbie nell'intera area del canale. Questa condizione di apparente disequilibrio è stata determinata dall'apertura e conseguente riassetto della bocca orientale, che ha sottratto alla bocca principale una parte del prisma di marea diminuendone la portata.

L'assetto sedimentologico della bocca principale e le velocità e modalità di crescita della parte terminale dello Scanno sono da attribuire ad una condizione di transizione verso un inevitabile riequilibrio idraulico tra i due bacini attigui. Ciò dovrebbe portare ad un approfondimento del canale e spostamento del suo asse verso ovest, vale a dire sottoflutto rispetto alla direzione di spinta di crescita della piattaforma della freccia litorale.

E' altresì possibile l'evolversi della bocca secondaria in un delta di riflusso, mediante riduzione della sezione per costruzione di morfologie di contrasto come le barre *swash* e quelle lineari, che coprono oggi parte dell'entrata. In ogni caso questo fenomeno, strettamente connesso all'evoluzione futura della bocca principale, potrà avvenire solo quando la sezione idraulica della bocca secondaria supererà l'assetto critico, che può determinarne l'occlusione.

In questo contesto dinamico, la riduzione della subsidenza ed un parziale recupero delle portate solide del Po, suggeriti da proiezioni di più autori, favoriranno, nei prossimi decenni, l'evoluzione della Sacca verso una configurazione di vero e proprio specchio lagunare, sempre che nuovi inter-

venti antropici non modifichino le attuali tendenze evolutive. Infatti anche i semplici dragaggi dei canali, che variano il prisma tidale, possono modificare cicli naturali dell'evoluzione dei delta di marea e quindi della conformazione della bocca lagunare (Johnsen et al., 1999).

A tal proposito è utile ricordare quanto scritto da Barnard e Davis (1999): "Il peso relativo d'effetti naturali ed antropogenici su una bocca lagunare è estremamente difficile da identificare, per la complessità dei suoi processi dinamici".

### Ringraziamenti

Gli autori ringraziano U. Tessari, A. Zamariolo, G. Calderoni e S. Bencivelli per la collaborazione che, in vario modo, hanno fornito durante lo svolgimento della ricerca ed A. De Nardo ed A. Bertoni per il supporto dato durante i rilievi di campagna.

Lo studio è stato condotto con finanziamenti della Regione Emilia-Romagna (Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7 - responsabile U. Simeoni) e dell'Università degli Studi di Ferrara (60% - responsabile U. Simeoni), e con fondi COFIN 98 del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (responsabili R. Dal Cin e G. Fontolan).

### Bibliografia

- Barnard P.L. e Davis R.A. Jr (1999) - *Anthropogenic vs natural influences on inlet evolution: west-central Florida*. Proc. Coastal Sediments 99, ASCE: pp. 1489-1504.
- Bruun P. (1966) - *Tidal inlets and littoral drift*. Universitetsforlaget, Norway, pp. 193.
- Bruun P. (1986) - *Morphological and navigational aspects of tidal inlets on littoral drift shores*. Journal of Coastal Research, 2, 123-143.
- Bruun P. e Battjes J. (1963) - *Tidal inlets and littoral drift*. Proc. Intl. As. Hydraulics Res., 4: pp. 123-130.
- Bruun P. e Gerritsen F. (1961) - *Stability of coastal inlets*. Proc. 7<sup>th</sup> Conf. Coastal Eng., A.S.C.E.: pp. 386-417.
- Dal Cin R. e Pambianchi P. (1991) - *I sedimenti della Sacca di Goro (Delta del Po)*. In: Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro, a cura di S. Bencivelli e N. Castaldi; Provincia di Ferrara, FrancoAngeli: pp. 253-263.
- Davies J.L. (1964) - *A morphogenetic approach to world shorelines*. Zeitschrift für Geomorphologie, 8: 27-42.
- Bruun P., Bhakta N. P. e Gerritsen F. (1974) - *Evaluation of overall entrance stability at tidal entrances*. Proc. 14<sup>th</sup> Conf. Coastal Eng., A.S.C.E., Copenhagen: pp. 1655-1684.
- Dal Cin R. (1983) - *I litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta: caratteri tessiturali e dispersione dei sedimenti, cause dell'arretramento e previsioni sull'evoluzione futura*. Boll. Soc. Geol. It., 102, 9-56.
- Fitzgerald D.M. (1988) - *Shoreline erosional-depositional processes associated with tidal inlets*. In: Aubrey D. G. & Weishar L. (Eds.), *Lecture Notes On Coastal and Estuarine Studies*, 29. pp. 186-225.
- Hayes M.O. (1975) - *Morphology of Sand Accumulations in Estuaries*. In: Gonin, L.E. (Ed), *Estuarine Research Academic Press*, New York: pp.1-28.
- Hubbard D.K. (1977) - *Variations in tidal inlet processes and morphology in the Georgia embayment*. Coast. Res. Div. Geol. Dep., Univ. S.C., Tech. Rep., 14-C. R. D., pp. 79.
- Hubbard D.K., Nummedal D. e Oertel G. (1979) - *The role of waves and tidal currents in the development of tidal inlet sedimentary structures and sand body geometry: examples from N. Carolina, S. Carolina and Georgia*. Journal of Sedimentary Petrography, 49, 4: 1073-1092.
- Jarrett J.T. (1976) - *Tidal prism-inlet area relationship*. U.S. Army Corps of Engineers, G.I.T.I. report: pp. 3-32.
- Johnsen C.D., Cleary W.J., Freeman C. e Sault M. (1999) - *Inlet induced shoreline changes, high energy flank of the Cape Fear foreland, SE NC*. Proc. Coastal Sediments 99, ASCE: pp. 543-562.

- McBride R.A. (1999) - *Spatial and temporal distribution of historical and active tidal inlets: Delmarva Peninsula and New Jersey, USA*. Proc. Coastal Sediments 99, ASCE: pp. 1505-1521.
- Nummedal D., Hine A.C., Hubbard D.K. e Oertel G.F. (1977) - *Tidal Inlet variability from Cape Hatteras to Cape Canaveral*. Proc. Coastal Sed. '77, A.S.C.E. : pp. 543-562.
- O'Brein M.P. (1931) - *Estuary tidal prisms related to entrance areas*. Civil Engineering, 1, 8: 738-739.
- O'Brein M.P. (1969) - *Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts*. Journal of the Waterways and Harbors Division, A.S.C.E., 95, WW1: pp. 43-52.
- O' Brien M.P. e Dean R.G. (1972) - *Hydraulics and sedimentary stability of coastal inlets*. In: Proc. 13<sup>th</sup> Coastal Eng. Conf., A.S.C.E.: pp. 761-779.
- Simeoni U., Borghesi A., Calderoni G., Ciavola P., Fontolan G., Gatti M., Gonella M., Tessari, U. e Zamariolo A. (1998) - *Analisi previsionale dell'evoluzione dello Scanno e della Sacca di Goro*. Regione Emilia-Romagna, Obiettivo 5B - Sottoprogramma 1, Misura 7 -, Relazione Finale. pp. 273

**Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 26/3/2000.**

## Dinamica sedimentaria dell'area di Goro (Delta del Po)

Umberto Simeoni<sup>1</sup>, Giorgio Fontolan<sup>2</sup>, Renzo Dal Cin<sup>1</sup>,  
Giovanni Calderoni<sup>1</sup> e Andrea Zamariolo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara  
C.so Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine, Università di Trieste.  
Comprensorio S. Giovanni, Via Weiss, 2 - 34127 Trieste

### Riassunto

La dinamica dell'area della laguna di Goro è condizionata dalla prominenza del Delta del Po e dalle variazioni delle sue portate. Essa risulta particolarmente articolata per la presenza delle foci del Po di Goro e di Volano, quest'ultima interna alla laguna stessa, e di due bocche lagunari, la più recente d'origine antropica. Se a tutto ciò aggiungiamo gli abbassamenti del territorio, indotti dalle estrazioni di gas ed acqua, la forte dinamicità evolutiva dello scanno, che separa la laguna dal mare, e le molteplici attività antropiche condotte nella Sacca è facile dedurre come la comprensione della dinamica sedimentaria dell'area non sia semplice.

Lo studio esamina le caratteristiche tessiturali dei sedimenti superficiali della laguna di Goro e dei fondali marini antistanti, evidenziandone la distribuzione e le variazioni intercorse nell'ambito di un decennio. L'interpretazione dei dati raccolti ha consentito di definire i principali assi di trasporto dei sedimenti, di individuare le principali aree di deposizione e le modalità con cui essa avviene.

### Inquadramento dell'area

La Sacca di Goro (Fig. 1) attuale presenta un'estensione di circa 2600 ettari (Idroser, 1994), con una profondità media che supera di poco il metro. I valori di marea nella Sacca variano da - 40 cm ad un massimo di + 80 cm. L'innalzamento dal livello medio mare supera quest'ultimo valore in momenti particolari (fenomeno dell'acqua alta) per effetto congiunto del *set-up* da onda, ingorgo causato dal vento e marea astronomica.

La Sacca e l'area circostante sono state e sono tuttora interessate da una forte subsidenza naturale, incrementata da numerosi interventi antropici di vario genere ed entità che, nel tempo, hanno interessato l'area del Delta. Ciò ha causato un forte abbassamento dei terreni circostanti messi a coltura, molti dei quali, durante la seconda guerra mondiale, si sono nuovamente allagati. La velocità d'abbassamento mantiene tutt'oggi ritmi sostenuti: studi recenti (Idroser, 1994) indicano per Goro valori di subsidenza di 2,73 e 3,61 cm/anno e per Goro di 1,63 e 2,31 cm/anno, rispettivamente per i periodi 1984-87 e 1987-93.

Nella laguna confluiscono le acque provenienti dal Po di Volano, dagli sbocchi delle idrovore e dalle chiuse sull'asta terminale del Po di Goro. Una freccia litorale (Scanno di Goro) separa dal mare aperto l'insenatura formatasi in seguito all'avanzata verso sud-est della foce del Po di Goro. La sua presenza e la continua evoluzione rappresentano elementi fondamentali per la vita della laguna perché ne condizionano sia la circolazione idrica e le caratteristiche fisico-chimiche delle masse d'acqua interne sia perché esercitano un controllo sulla sedimentazione dell'area (Dal Cin e Pambianchi, 1991; Dal Cin, 1994; Simeoni et al., 1998). A sud la laguna si apre al mare attraverso una bocca na-

turale, delimitata ad occidente dal litorale di Volano, ed una, d'origine antropica, situata all'incirca nella parte centrale della freccia litorale.

Tra gli anni '50 ed '80 sono stati effettuati interventi di difesa nell'area della Sacca: opere aderenti e parallele all'interno della Sacca, posa di difese radenti (tubi longard) e siepi frangivento lungo lo Scanno. Altri interventi, che hanno alterato le caratteristiche naturali della Sacca, sono da ricollegarsi alla recente apertura di un canale artificiale attraverso lo Scanno, alle attività legate alla pesca a strascico ed all'allevamento di vongole e mitili.

L'alimentazione sedimentaria della Sacca è principalmente legata agli apporti solidi del Po. A scala regionale, il delta del Po mostra una distribuzione dei sedimenti marcatamente asimmetrica con massima estensione di sedimenti fangosi nell'area più meridionale, alimentata dai contributi di materiale in sospensione prevalentemente dai rami di Po di Pila, Po di Tolle, Po di Gnocca e Po di Goro (Dal Cin, 1983). Idroser (1994) suggerisce che la quantità di materiale sabbioso che giunge nella Sacca di Goro non possa essere superiore all'apporto fornito dai rami del Po di Goro e di Gnocca, e parzialmente del Po di Tolle (50%), dunque circa il 25% del volume complessivo del materiale to-

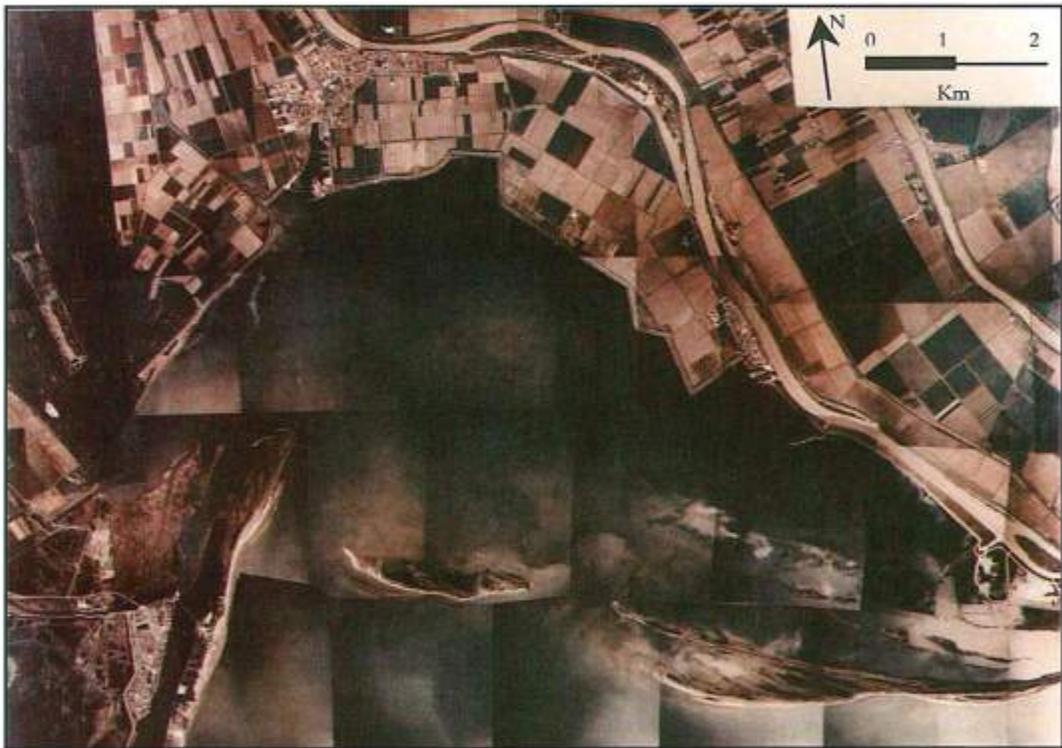


Figura 1 - Fotomosaico della Sacca di Goro del 1996 (scala grafica approssimativa).

taie trasportato sul fondo dal Po. Per quanto riguarda il trasporto in sospensione, il Po di Goro contribuisce per circa il 9% del trasporto torbido complessivo del fiume e poiché quest'ultimo è pari a 10,5 milioni di t/anno, si deduce che il ramo di Goro immette in mare circa 0,94 Mt/anno di sedimenti. Poiché questo ramo del Po ha una limitata capacità di trasporto sul fondo (intorno al 5% della capacità complessiva), e dato che il suo alveo è costituito da sabbie solo per il 63%, a fronte di valori intorno all'80-90% degli altri rami deltizi (Dal Cin e Simeoni, 1984), si può supporre che i suoi contributi siano costituiti in prevalenza da limi ed argille. Sulla base delle alterazioni volumetriche subite dal Delta (Idroser, 1994), mancando ricerche dirette alla valutazione del trasporto sul fondo, si può stimare per il Po di Goro, nel quinquennio 1975-1980, un apporto di materiali sabbiosi complessivo di circa 1,3 Mm<sup>3</sup>.

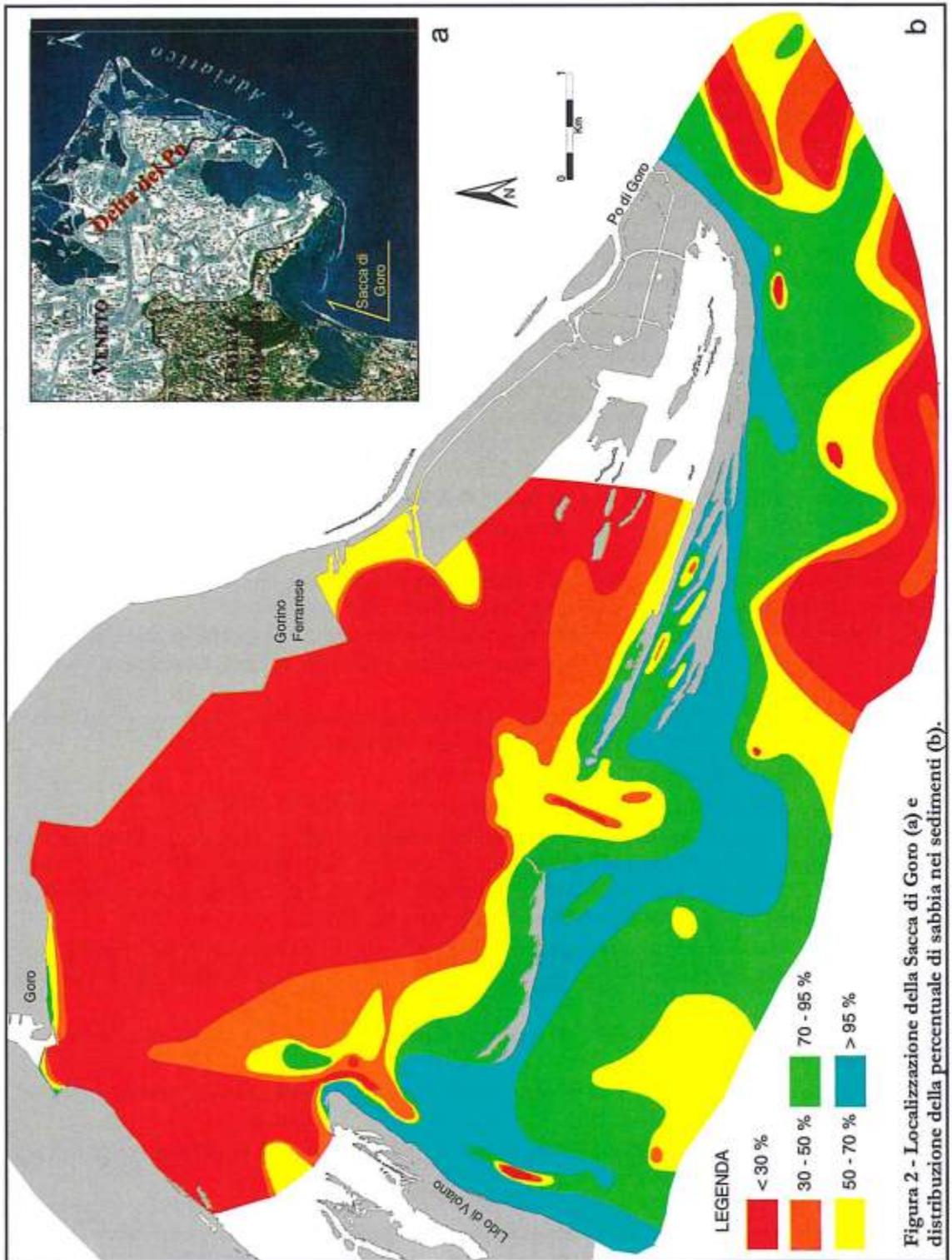


Figura 2 - Localizzazione della Sacca di Goro (a) e distribuzione della percentuale di sabbia nei sedimenti (b).

Per l'ultimo ventennio sono disponibili stime (Idroser, 1994) sufficientemente accurate dell'effettivo budget sedimentario dell'area di Goro: nell'area sono giunti nel 1980 0,19 Mm<sup>3</sup> di sedimenti, 0,21 Mm<sup>3</sup> nel 1985, 0,24 Mm<sup>3</sup> nel 1990 ed, infine, 0,25 Mm<sup>3</sup> nel 1995. Tali materiali, tuttavia, solo in minima parte alimentano la freccia litorale: gran parte sono dispersi verso il largo secondo direttrici che variano durante l'anno (Dal Cin, 1983; 1994), mentre in quantità subordinata entrano nella Sacca ove sedimentano nelle aree marginali o protette dallo Scanno.

Ai materiali portati dai rami del Po vanno aggiunti 0,3 Mm<sup>3</sup>/anno di sedimenti trasportati dalla corrente lungo riva che risale da meridione e si esaurisce nella laguna, e quelli legati alla produzione bioclastica, la cui quantificazione è estremamente difficoltosa. Uno studio condotto (Dal Cin e Pambianchi, 1991) su oltre un centinaio di campioni ha evidenziato come i sedimenti della Sacca siano caratterizzati da percentuali di CaCO<sub>3</sub> comprese tra 10 e 15%. Tali valori sono superiori a quelli che normalmente caratterizzano le sabbie portate dal Po e quindi indicativi dei contributi bioclastici dell'area.

In quest'ultimo secolo, anche nei periodi di maggior deficit sedimentario del Po (anni '60-'80) la Sacca ha mantenuto una funzione di "trappola sedimentaria", presentando un bilancio dei materiali in attivo. A riprova di ciò risulta che negli ultimi 10 anni sui fondali antistanti lo Scanno di Goro si sono depositati circa 8 milioni di m<sup>3</sup> di sedimento.

### *I sedimenti*

Come in tutti gli ambienti lagunari, la conoscenza delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti può fornire indicazioni valide sulla dinamica delle acque e, per via indiretta, sul livello d'energia nelle varie aree lagunari.

La granulometria inoltre influisce in modo determinante sulle possibilità d'insediamento d'alcuni organismi, quali i mitili, la cui importanza per l'economia locale è fondamentale.

Dalle caratteristiche tessiturali dei sedimenti, infine, dipende anche la capacità di intrappolare sostanze inquinanti e di rilasciarle successivamente (Förstner e Wittmann, 1979; Salomons e Förstner, 1984).

Un precedente studio (Dal Cin e Pambianchi, 1991) condotto sui sedimenti superficiali dell'area di Goro (Fig. 2, pag. prec.), prelevati nel 1985/86, aveva evidenziato che:

- i sedimenti più diffusi erano di tipo argilloso e limoso;
- le sabbie erano presenti in prossimità della bocca e nella parte orientale della Sacca;
- la presenza di frazioni sabbiose era legata presumibilmente alle mareggiate, al proseguimento entro la laguna del trasporto solido lungo riva a partire dagli Scanni di Goro e di Volano, all'esistenza di paleostrutture sabbiose (gli antichi scanni, ora quasi del tutto smantellati e trasformati in barene), alla presenza di bioclasti, alle correnti di marea;
- la presenza dello Scanno esercitava notevole influenza sulla sedimentazione delle parti centrale ed orientale della Sacca, soprattutto per la sua funzione protettiva nei confronti delle mareggiate;
- il fattore predominante sul livello energetico era il moto ondoso, mentre ruolo subordinato assumevano le correnti di marea;
- particolarmente efficaci, nei riguardi della circolazione idrica, erano i mari provenienti da Scirocco (SE);
- le aree a minor energia erano quelle che cingono i limiti più interni della Sacca e quelle maggiormente protette dallo Scanno.

Nel decennio successivo la migrazione e l'evoluzione dello Scanno, l'apertura artificiale di un varco, rapidamente trasformatosi in un'ampia bocca lagunare, hanno determinato un significativo riassetto dei fondali, modificando significativamente la dinamica sedimentaria dell'area delle bocche.

Va anche ricordato che nell'area in esame la componente antropica, che si esplica attraverso profondi rimaneggiamenti operati dalle rasche, per la pesca delle vongole, e dalle draghe, per il mantenimento dell'ufficiosità del canale navigabile d'accesso al porto di Goro, e dello scavo di nuovi canali lagunari, per migliorare la circolazione idrica della laguna, ha prodotto e produce sensibili variazioni sull'assetto dei fondali e sulla tessitura dei materiali di fondo.

Per verificare i cambiamenti avvenuti nei fondali marini e lagunari sono stati effettuati, tra il 1997, 1998 e 1999, oltre 200 prelievi di sedimento superficiale, classificati utilizzando il diagramma di Shepard (Fig. 3). Per l'ubicazione dei campioni si veda la figura 4. L'analisi delle loro caratteristiche tessiturali, parzialmente integrate, ma solo per le aree interne della laguna perché meno suscettibili di rapidi cambiamenti composizionali, dalle informazioni fornite dallo studio di Dal Cin e Pambianchi (1991) hanno consentito di fotografare l'attuale dinamica sedimentaria dell'area.

### Caratteristiche dei sedimenti

Per la classificazione dei sedimenti sono stati utilizzati sia il diagramma ternario di Shepard (1954) sia quello di Stevens (1984): il primo per uniformità con lo studio condotto negli anni '80 ed il secondo (Fig. 5) perché migliora la distinzione tra le particelle fini e grossolane. Secondo la suddivisione proposta da Shepard (1954) la maggior parte dei sedimenti raccolti sono classificabili come sabbie (54,4 %), argille limose (15,9 %) e argilla-silt-sabbia (10 %). Nel diagramma non viene fatta alcuna distinzione in base al contenuto d'argilla, che raggiunge, in alcuni casi, anche il 58,6 %.

I sedimenti sabbiosi o prevalentemente sabbiosi sono concentrati lungo le spiagge fino ad una profondità di 2 m e presso l'imboccatura principale della Sacca, lungo una fascia che si sviluppa con una direzione coerente con quella dei mari di Scirocco. Nelle aree, poco estese, in cui compaiono sabbie argillose, si può ipotizzare che la frazione sabbiosa sia prevalentemente costituita da frammenti bioclastici. Le aree a limo argilloso e, soprattutto, ad argilla limosa rappresentano le zone a minima energia, sia perché riparate dagli scanni di Goro e Volano, sia perché gli effetti dell'escursione di marea si fanno sentire in misura assai attenuata. La stessa litologia contraddistingue alcune aree meno estese, ma più articolate, in corrispondenza della foce del Po di Goro e delle massime profondità dei fondali marini antistanti lo Scanno. Da segnalare la presenza di un solo campione di silt e l'assenza di sedimenti, secondo la classificazione di Shepard, di argilla e argilla sabbiosa.

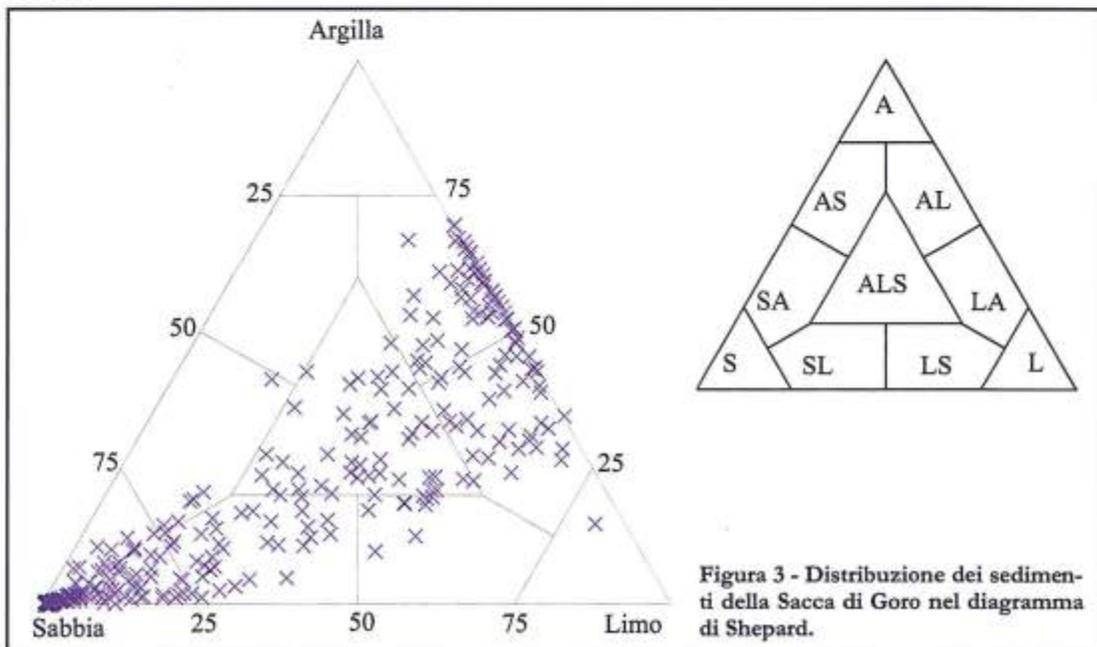
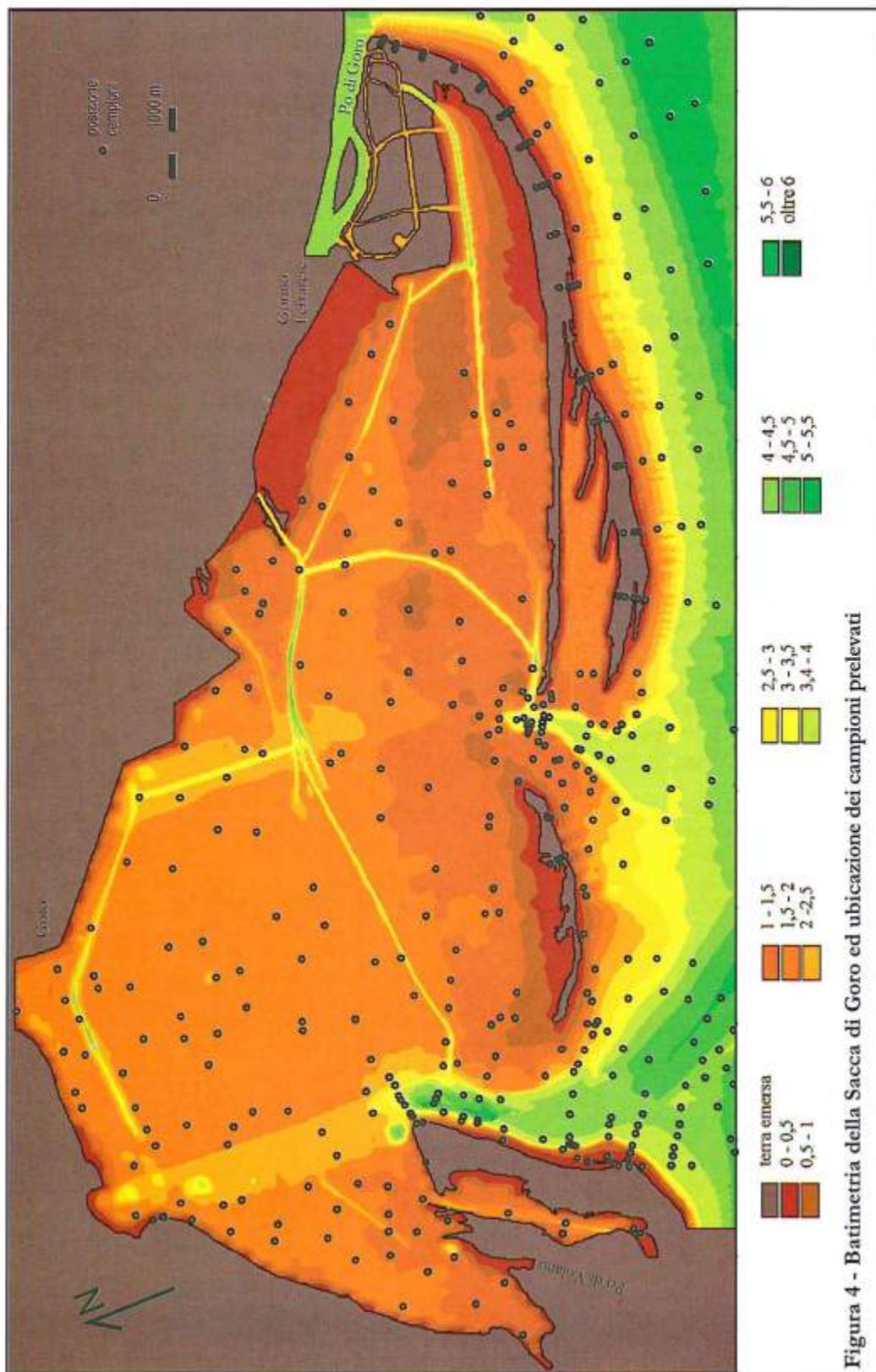


Figura 3 - Distribuzione dei sedimenti della Sacca di Goro nel diagramma di Shepard.



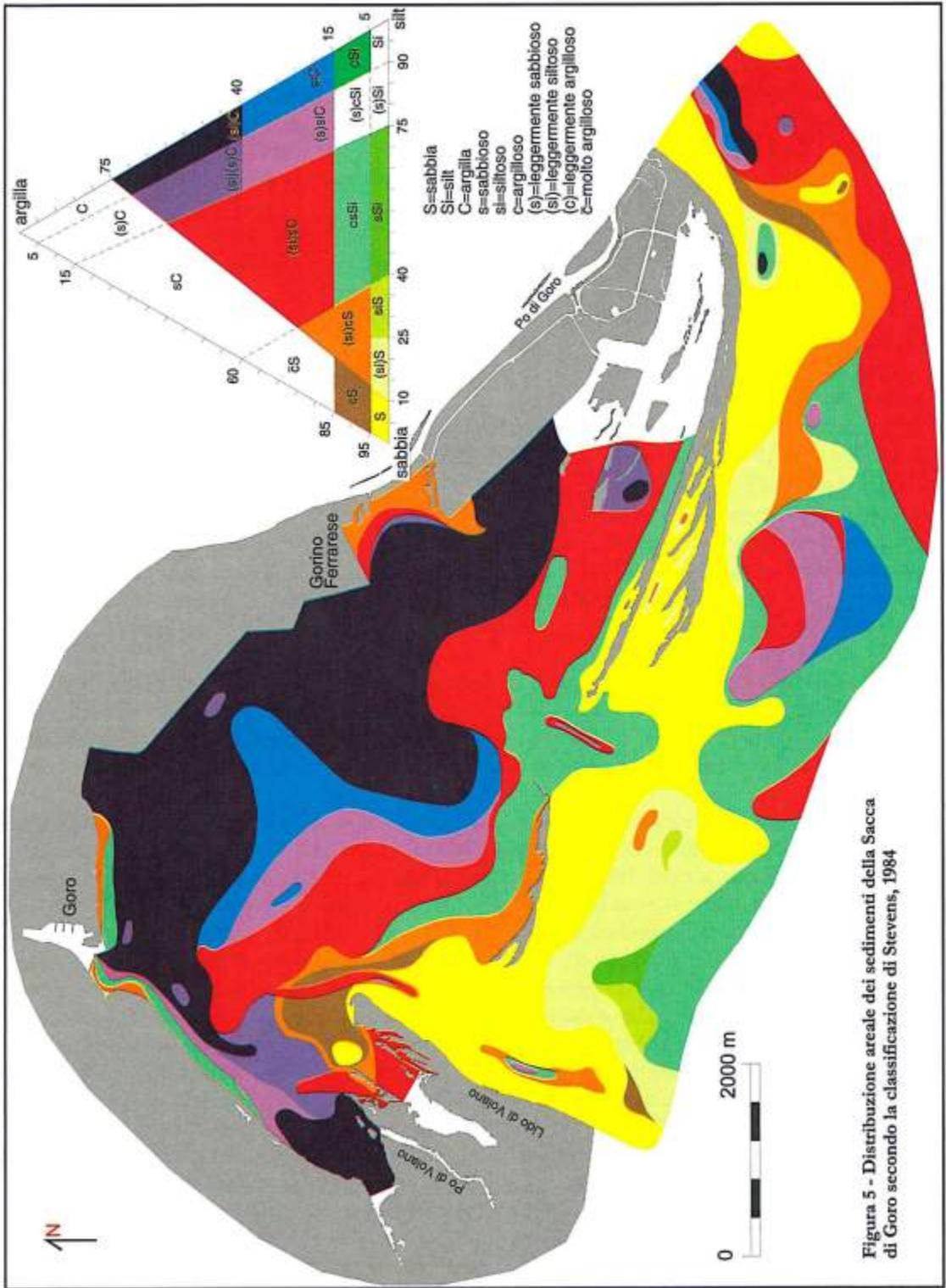


Figura 5 - Distribuzione areale dei sedimenti della Sacca di Goro secondo la classificazione di Stevens, 1984

La classificazione di Stevens (1984) interpreta gli stessi campioni con almeno sette diverse classi, offrendo così considerazioni più accurate in base alla suddivisione interna del campo dimensionale del silt. In sostanza, questa classificazione offre un buon compromesso fra sinteticità e capacità descrittiva. Dall'analisi della figura 5 è possibile suddividere l'area indagata in tre grandi zone a seconda che prevalga la sabbia, il silt o l'argilla. I sedimenti superficiali dell'area lagunare presentano una componente principale d'argilla (sempre superiore al 5 %) che presenta le massime percentuali (tra 40 e 70 %) lungo il lato nord orientale della Sacca. La presenza di questi sedimenti suggerisce che la parte interna della laguna sia un'area riparata dal moto ondoso, per la protezione offerta dallo Scanno, con deboli o trascurabili effetti legati alle correnti di marea. Percentuali consistenti di sabbia frammista ad argilla e con una componente secondaria di silt [(si)cS] caratterizzano piccoli tratti in corrispondenza di Goro e di Gorino, il primo probabilmente dovuto ai lavori di scavo legati alla costruzione e manutenzione del porto di Goro, mentre il secondo rappresenta vecchie conoidi di rotta del Po.

Assai interessante risulta l'area di copertura dei sedimenti classificati come siC (argilla con una componente di silt) perché si estende fino al limite nord orientale della laguna. Essa potrebbe essere rappresentativa della diffusione del moto ondoso, che entra attraverso la bocca principale, e dell'effetto dell'espansione del flusso mareale.

Il contenuto in acqua dei campioni raccolti nel 1998 sui fondali della Sacca varia considerevolmente: da un minimo di 18,5% ad un massimo di 63,1% (Simeoni et al., 1999). Le densità dei materiali mostra invece una variazione piuttosto contenuta, entro valori compresi tra 2,59 e 2,78 gcm<sup>-3</sup>. Il diagramma di figura 6 evidenzia la variazione di questi due parametri in funzione del contenuto di sabbia, riportata in sequenza crescente di valori. Come si può notare, esiste una certa tendenza al decremento del contenuto in acqua all'aumentare della sabbia, mentre la densità non mostra alcun andamento significativo. E' dunque evidente che i sedimenti superficiali mostrano un gradiente d'acqua crescente procedendo verso le parti interne della Sacca, caratterizzate dai massimi tenori in fango.

La densità dei sedimenti superficiali appare decisamente più disomogenea arealmente, tuttavia il range dei valori rientra nel campo dei materiali "naturali" di varia litologia. Possono quindi essere escluse, almeno in prima istanza, forti commistioni con matrici di natura antropogenica, quali oli minerali ed idrocarburi in genere, che tendono ad abbattere i valori al di sotto di 2,2-2,3 g.cm<sup>-1</sup> (Furlan et al., 1999).

La banda di csSi (Fig. 5), sedimenti silteosi con componenti di sabbia ed argilla, delimita all'interno della laguna l'area della piattaforma dello Scanno. In corrispondenza della bocca secondaria essa si allarga delimitando l'area sia del delta di flusso sia di riflusso, mentre in corrispondenza di quella principale si assottiglia fino a scomparire in corrispondenza del bordo orientale del canale.

La classe granulometrica dei sedimenti che occupa la maggiore estensione all'interno della bocca di Volano è quella della sabbia. Procedendo verso l'interno vi è la tendenza all'incremento della componente argillosa [cS, (si)cS], mentre procedendo verso mare i sedimenti sabbiosi si arricchiscono nella frazione silteosa [(si)S, sSi]. L'area del canale è evidenziata da due aree strette ed allungate lungo l'asse nord-sud: la prima, più interna e corrispondente alla maggiori profondità, dove prevalgono i sedimenti (si)sC (argille con una percentuale principale di sabbie ed una secondaria di silt e la seconda, più spostata verso mare, dove alla sabbia si uniscono componenti importati di silt o d'argilla. I fondali marini prossimi a riva sono caratterizzati da una stretta ed articolata fascia di sedimenti sabbiosi, più ampia verso ovest in corrispondenza della bocca principale, per effetto delle correnti di marea. L'allargamento di questa fascia in corrispondenza della parte terminale dello Scanno potrebbe essere sintomatico della crescita di una nuova geminazione: l'accumulo di sabbia rappresenterebbe l'embrione della piattaforma sommersa di una nuova freccia litorale.

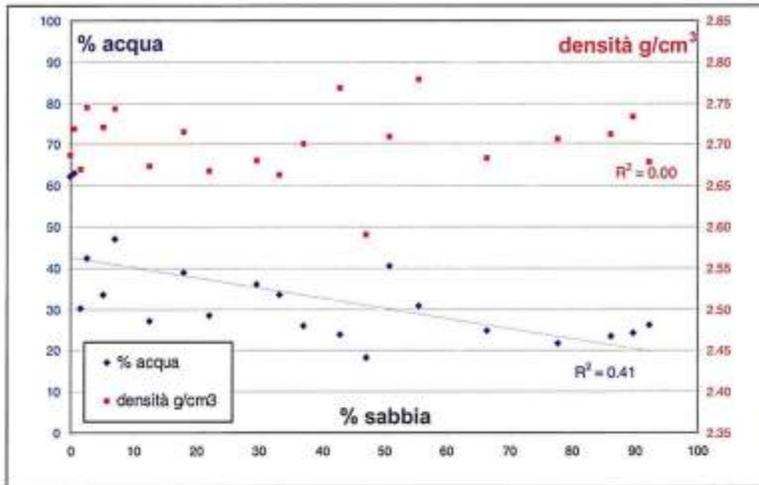


Figura 6 - Andamento della percentuale d'acqua e della densità dei sedimenti in funzione della percentuale di sabbia.

La terza ed ultima banda è caratterizzata da sedimenti siltosi con una componente principale prevalentemente sabbiosa. Si estende generalmente da profondità prossime a 2 m verso i fondali più profondi ed il suo andamento è molto articolato per la presenza di numerose ondulazioni. E' probabile che la distribuzione risenta degli effetti di diffrazione e della rifrazione delle onde su questi fondali complessi perché caratterizzati dalle numerose micro e macro digitazioni dello Scanno. Verso mare, a profondità comprese tra 5 e 6 m, essa si chiude a ridosso di sedimenti argillosi con una componente principale di sabbia e secondaria di silt [(si)C].

Questi materiali ed altri con maggior contenuto d'argilla [siC ed (si)C] presentano una maggiore diffusione anche a profondità minori (circa 3 m) in corrispondenza dell'area del delta sommerso del Po di Goro, dove avviene la deposizione dei materiali fini portati dal fiume. La forma e l'estensione di questi accumuli evidenzia come la distribuzione di questi materiali portati dal fiume avvenga in un'area molto ristretta e come la componente principale della loro dispersione sia diretta verso mare e verso ovest.

I valori della deviazione standard (Fig. 7) evidenziano come la maggior parte dei campioni siano ben classati; in particolare modo sono le sabbie e le sabbie pelitiche ad essere prevalentemente ben o molto ben classate. Il confronto con il diametro medio ( $\ln \phi$ ) e con la percentuale di fango, mette in rilievo l'esistenza di una buona correlazione inversa tra i due parametri (rispettivamente,  $R^2=0,73$  e  $R^2=0,74$ ), mentre è priva di significato con la profondità ( $R^2=0,34$ ).

La variazione dell'asimmetria (Fig. 7) non fornisce molte informazioni, anche con il confronto con la profondità ( $R^2 = 0,22$ ): essa varia da  $-0,16$  a  $0,84$ , ma risulta negativo solo in una decina di campioni. I sedimenti prelevati nell'area manifestano una buona simmetria: sono ancora le sabbie e le sabbie pelitiche a presentare prevalentemente questa caratteristica. Infine, poco più della metà dei campioni analizzati è mesocurtica, e sono ancora le sabbie e le sabbie pelitiche ad avere tale caratteristica. Tra i campioni pelitico sabbiosi e molto sabbiosi prevale una classazione da moderata a buona, l'asimmetria positiva e la mesocurticità. Le curve di frequenza denotano una costante unimodalità delle sabbie, fatti salvi alcuni campioni bimodali. Nei casi di materiali più fini, dove tende a prevalere la componente pelitica, le classi dimensionali della sabbia sono ridotte al solo campo di transizione verso il silt grossolano. La caratterizzazione risultante è quindi meno significativa dei restanti, seppur identificativa di un processo di graduale decremento dimensionale tipico dei processi selettivi. La distribuzione della media, che è risultata pressoché coincidente con quella della moda, mostra una ben evidente zonazione areale. I più bassi valori di  $Mz$  ( $2,0 \phi < Mz < 2,5 \phi$ ) si trovano in corrispondenza della fascia costiera di Volano, dimostrando così l'alta competenza del trasporto lungo costa che caratterizza quest'area. Per lo stesso motivo anche parte della fascia costiera dello Scanno è contraddistinta dallo stesso campo dimensionale.

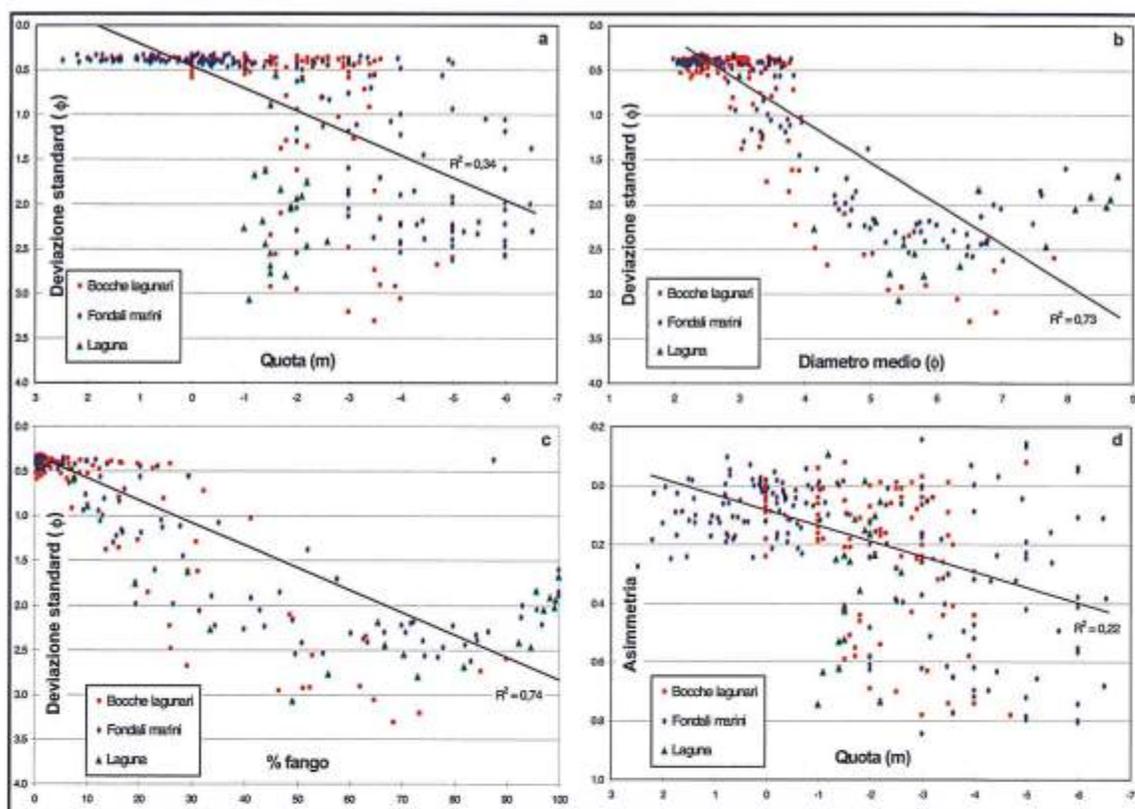


Figura 7 - Confronto fra parametri granulometrici dei sedimenti: a - Deviazione standard Vs. Quota; b - Deviazione standard Vs. Diametro medio; c - Deviazione standard Vs. percentuale fango; d - Asimmetria Vs. Quota.

L'imboccatura del canale, ed in pratica la quasi totalità del canale tidale, sono distinti da un Mz compreso tra  $2,0 \phi$  e  $3,0 \phi$ , come parte della piattaforma della freccia litorale. Questa distribuzione indica che la corrente tidale risulta meno competente del trasporto lungo costa nella distribuzione dei sedimenti. Rispetto allo Scanno, il decremento di Mz verso sud-ovest indica una perdita di competenza del trasporto lungo costa, legata all'aumento della profondità.

Gli Mz maggiori ( $> 5,0 \phi$ ) sono distribuiti in due aree: la prima verso mare rispetto allo Scanno, e la seconda all'interno della laguna. Nel primo caso, il calo dimensionale verso profondità maggiori rappresenta il prevalere del dominio marino, caratterizzato da Mz compresi tra  $3,5$  e  $7,0 \phi$ . Nel secondo caso esso rappresenta la naturale diminuzione delle dimensioni, che si ha spostandosi verso l'interno della laguna, in corrispondenza d'acque più tranquille.

La distribuzione della moda conferma totalmente ciò che è stato appena esposto: a zone con alta competenza, come la costa di Volano, la parte mediana del canale tidale e parte della costa dello Scanno, corrisponde la moda più elevata ( $2,5 \phi$ ), che va aumentando a mano a mano che la competenza diminuisce a sua volta. Infine, le mode  $3,0$  e  $3,5 \phi$  si localizzano nelle zone di transizione tra i due campi estremi, che competono alla corrente tidale e alla corrente litoranea da un lato, e al dominio marino dall'altro.

Confrontando le relazioni esistenti fra deviazione standard, diametro medio e percentuale di fango dei sedimenti superficiali dell'area della bocca principale viene evidenziata la presenza dei tre raggruppamenti. Il primo gruppo si identifica con i campioni aventi deviazione standard inferiore  $0,7 \phi$ , diametro medio compreso tra  $2$  e  $4 \phi$  e percentuale di fango  $< 20 \%$ ; il secondo presenta deviazione standard compresa fra  $0,7$  e  $2,7 \phi$ , diametro medio tra  $2,9$  e  $5 \phi$  e percentuale di fango tra  $10$

% e 40 %; infine il terzo gruppo individua sedimenti con deviazione standard compresa fra 1,5 e 3,3  $\phi$ , diametro medio  $>5 \phi$  e percentuale di fango  $>40$  %.

Il primo gruppo si identifica con i campioni situati al centro dell'imboccatura della Sacca, lungo lo Scanno e lungo la spiaggia di Volano. In generale, c'è da sottolineare che la tendenza al restringimento dell'imboccatura della Sacca, causato dalla costante e progressiva migrazione dello freccia litorale verso ovest (Volano), ha influenzato il fattore idrodinamico, il quale a sua volta ha un notevole effetto sulla sedimentazione. L'area, soggetta al moto ondoso e agli effetti dell'escursione di marea, assume un livello d'energia tale da impedire il deposito di particelle fangose. Infatti, per quanto riguarda i campioni situati al centro dell'imboccatura della sacca, considerando la percentuale di sabbia come un indicatore del livello d'energia, si può dedurre che la massima energia si trovi all'imboccatura della Sacca.

Nei campioni situati lungo lo Scanno e lungo la spiaggia di Volano, l'elevata percentuale di sabbia è dovuta all'azione delle correnti lungo riva, che nel caso di Volano proseguono, per un certo tratto, entro la sacca.

Il secondo gruppo si identifica, in generale, con la zona in cui ha inizio l'approfondimento dei fondali verso mare. All'aumentare della profondità si osserva una crescita continua della percentuale di fango ben visibile nella figura 2. Questo fenomeno è indotto dalla frequenza e dall'energia con cui il moto ondoso interessa l'interfaccia acqua-sedimento, selezionando le particelle in funzione della resistenza, che queste riescono ad opporre all'energia dell'onda. Al crescere della profondità l'azione del moto ondoso diviene sempre più debole, consentendo la deposizione di particelle dimensionalmente sempre più piccole, le quali si sostituiscono alla sabbia. In pratica il calo d'energia consente un graduale incremento di silt e fango a spese della frazione sabbiosa.

Il terzo gruppo si identifica, in generale, con i fondali della laguna e con la zona più interna della bocca, probabilmente interessata dalla rampa di flusso. Lungo la rampa di flusso, cioè quella rampa a debole pendenza inclinata verso mare, risale la massa d'acqua legata al flusso di marea crescente. In quest'area ha un notevole effetto sulla sedimentazione il fattore idrodinamico. L'area è riparata nei confronti del moto ondoso dallo Scanno e gli effetti dell'escursione di marea si fanno sentire in modo attenuato. Per tali ragioni il livello dell'energia è molto basso e ciò favorisce il deposito delle particelle fangose.

### **Dinamica sedimentaria**

La diminuzione progressiva della sabbia ed il contemporaneo aumento del fango allontanandosi dall'imboccatura, fanno ragionevolmente ipotizzare che in quest'area il principale, se non l'unico, fattore responsabile della distribuzione dei sedimenti sia di carattere idrodinamico. Anche lo studio effettuato da Dal Cin e Pambianchi (1991) aveva evidenziato come le caratteristiche granulometriche variassero con continuità andando dall'imboccatura della Sacca verso l'interno.

Dal confronto degli studi effettuati nel decennio scorso emerge un aumento della presenza di argilla nella parte interna della laguna. E' ragionevole supporre che nella Sacca le argille si depositano non solo per un abbassamento progressivo del livello d'energia, ma anche per flocculazione dovute alla variazione del pH all'incontro acqua dolce-salata. Ciò però è in contrasto con le percentuali non particolarmente elevate di argilla rinvenute in prossimità della foce del Po di Volano.

Considerando la percentuale di sabbia come un indicatore del livello di energia, si può dedurre che la massima energia si trovi all'imboccatura principale della laguna e lungo la direttrice che dalla parte occidentale dell'imboccatura arriva a Goro. Tale energia è certamente legata anche alle correnti di marea; tuttavia riteniamo che influisca soprattutto l'energia del moto ondoso. In modo particolare dovrebbero avere il massimo influsso sul "lavaggio" dei sedimenti i mari di Scirocco, che si infilano nel settore nordoccidentale della sacca obliquamente, a causa della presenza dello Scanno, che funge da barriera protettiva. Infatti la disposizione della fascia a più elevata percentuale di sabbia è nettamente orientata in senso nord-sud.

La maggior percentuale di sabbia lungo la direttrice Volano-Goro è dovuta anche alla prosecuzione entro la Sacca, per un certo tratto, del trasporto dei sedimenti lungo riva, sedimenti provenienti dalle spiagge di Volano e da quelle dello Scanno.

Nella parte più interna di quest'area vi è una elevata percentuale di fango. Poiché qui i fondali non presentano caratteristiche batimetriche particolari, si deduce che l'elevata concentrazione del fango non è dovuta a ragioni morfologiche ma soprattutto a fattori idrodinamici. Anche in questo caso riteniamo che tale situazione sia legata non tanto ai lievi effetti dell'escursione di marea, quanto ad una forte diminuzione dell'energia del moto ondoso. L'esistenza, l'estensione e la disposizione della fascia fangosa in questa parte della sacca, oltre che da fattori fisici comuni ad altre lagune di questo tipo, sono certamente condizionate dalla presenza e dalla disposizione dello Scanno. Questo esercita sui fondali della sacca una protezione dalle mareggiate, in modo particolare da quelle di Scirocco. Ciò si deduce dalla forma dell'area ad alta concentrazione di fango: il "cono d'ombra" generato dallo Scanno non può riferirsi che ai mari di Scirocco.

Dallo studio condotto ed in accordo con quanto rilevato da Dal Cin e Pambianchi (1991) risulta che le aree ove meno si fanno sentire gli effetti del moto ondoso e dell'escursione di marea sono, nel complesso, le parti marginali della Sacca: in modo particolare quelle protette dall'agitazione del mare, grazie allo Scanno di Goro.

### Conclusioni

L'analisi della distribuzione dei sedimenti e delle loro caratteristiche tessiturali ha consentito di evidenziare le principali direttrici di trasporto ubicate lungo la spiaggia di Volano e lo Scanno di Goro, ed alcune minori confinate nelle bocche lagunari. Il confronto con i rilievi del 1985/86 hanno messo in evidenza le modificazioni introdotte dall'apertura della nuova bocca lagunare e dal restringimento di quella principale.

Analizzando i processi di riduzione granulometrica è stato possibile individuare le aree di transizione tra mare, bocche lagunari e laguna. La deposizione dei materiali fini dovuti al richiamo d'acqua che si crea alle spalle dello Scanno, per l'espansione del getto della corrente tidale, vengono ben evidenziati dal confronto dei diagrammi e delle mappe tessiturali. Così come gli effetti del moto ondoso e dell'escursione di marea sui fondali della laguna sono stati qualitativamente individuati. Lo studio ha inoltre evidenziato come la diversa circolazione delle masse d'acqua abbia determinato una nuova distribuzione dei livelli di energia nei fondali lagunari.

Un aspetto applicativo estremamente importante dell'indagine condotta è collegato allo sfruttamento ittico dell'area, che è particolarmente legato alla distribuzione dei sedimenti sabbiosi e della circolazione idrica. I risultati ottenuti possono dunque fornire utili informazioni per approntare un corretto piano per l'utilizzo delle risorse dell'area.

### Ringraziamenti

Gli autori ringraziano U. Tessari, A. De Nardo e S. Bencivelli per la collaborazione che, in vario modo, hanno fornito durante lo svolgimento della ricerca.

Lo studio è stato condotto con finanziamenti della Regione Emilia-Romagna (Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7 - responsabile U. Simeoni) e dell'Università degli Studi di Ferrara (ex 60% - responsabile U. Simeoni), e con fondi COFIN98 del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (responsabile R. Dal Cin).

### Bibliografia

- Dal Cin R. (1983) - *I litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta: caratteri tessiturali e dispersione dei sedimenti, cause dell'arretramento e previsioni sull'evoluzione futura*. Bollettino Società Geologica Italiana, 102: 9-56.
- Dal Cin R. (1994) - *Lo scannone di Goro nel Delta del Po: evoluzione morfologica e possibili interventi per conservare l'ambiente della laguna retrostante*. In: Bencivelli S., Castaldi N. & Finessi D. (Editors), Sacca di

- Goro: Studio integrato sull'ecologia in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo - 2° anno di ricerche. Franco Angeli, Provincia di Ferrara, Milano, I. pp. 291-303.
- Dal Cin R. e Pambianchi P. (1991) - *I sedimenti della Sacca di Goro (Delta del Po)*. In: Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro, a cura di S. Bencivelli e N. Castaldi; Provincia di Ferrara, Franco Angeli: pp. 253-263.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1984) - *Variazioni volumetriche del delta padano nell'ultimo secolo, distribuzione dei sedimenti nei rami deltizi e caratteri granulometrici dei materiali cavati nel basso Po*. In: Atti del 2° Convegno di Idraulica Padana, Tecnografica, Parma, I. pp. 255-279.
- Förstner U. e Wittmann G.T.W. (1979) - *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer, Berlin. pp. 257.
- Furlan N., Fontolan G., Sartore L., Milani B., Mosca R. e Meriani S. (1999) - *Caratterizzazione chimico-fisica dei sedimenti del porto di Trieste e problematiche derivanti dall'eventuale dragaggio e smaltimento a mare*. Bollettino della Società Adriatica di Scienze, 79: 3-26.
- Idroser (1994) - *Aggiornamento ed integrazione del Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola. Relazione generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp. 276.
- Salomons W. e Förstner U. (1984) - *Metals in the hydrocycle*. Springer, Berlin. pp. 312.
- Simeoni U., Borghesi A., Calderoni G., Ciavola P., Fontolan G., Gatti M., Gonella M., Tessari, U. e Zamariolo A. (1998) - *Analisi previsionale dell'evoluzione dello Scanno e della Sacca di Goro*. Regione Emilia-Romagna, Obiettivo 5B - Sottoprogramma 1, Misura 7 -, Relazione Finale. pp. 273.
- Shepard F.P. (1954) - *Nomenclature based on sand-silt-clay ratios*. Journal of Sedimentary Petrology, 24: 151-158.
- Simeoni U., Bezzi A., Calderoni G., Covelli S., Fontolan G., Sartore L., Tesolin V., Tessari, U. e Zamariolo A. (1999) - *Caratteristiche dei sedimenti della Sacca di Goro*. Regione Emilia-Romagna, Obiettivo 5B - Sottoprogramma 1, Misura 7 -, Relazione Finale. pp. 137
- Stevens R. (1984) - *A new sand-silty-clay triangle for textural nomenclature*. Geologiska Foreningens Stockholm Forhandlingar, 105: 245-250.

Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 26/3/2000.

## Contributo alla conoscenza del clima meteomarinico della Sacca di Goro: misure correntometriche e mareografiche

Paolo Ciavola<sup>1</sup>, Marco Gonella<sup>2</sup>, Umberto Tessari<sup>1</sup> e Andrea Zamariolo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara  
Corso E. I d'Este, 32 - 44100 Ferrara.

<sup>2</sup>MED INGEGNERIA S.r.l., Riviera Ruzzante, 49-35123 - Padova

### Riassunto

L'analisi dei dati anemologici ed ondometrici ha permesso di caratterizzare il clima meteo-marino della Sacca di Goro, dominato da eventi provenienti dal I e dal II quadrante. Misure correntometriche hanno identificato differenti regimi tidali tra la parte interna ed esterna del canale principale. Tramite misure mareografiche si sono determinati ritardi di marea lungo il canale che, dalla bocca secondaria, nella zona interna della Sacca, si dirige verso la foce del Po di Goro. Tale canale è caratterizzato da una netta separazione tra masse d'acqua dolce, di origine fluviale e acque marine entranti dalla bocca secondaria.

### Introduzione

Nel seguente articolo vengono presentati i rilievi idrodinamici effettuati sulle bocche della Sacca di Goro e nella parte interna della laguna (Fig. 1) allo scopo di identificare le caratteristiche del sistema.

Le misure di corrente e livello di marea sono state effettuate mediante l'installazione di stazioni di misura a breve termine (giorni-settimane). Il clima di moto ondoso, invece, è stato caratterizzato mediante revisione di dati pregressi disponibili per l'area. Le misure anemologiche sono state ricavate dalla centralina meteorologica posta sul Lido di Volano e di proprietà della Centrale ENEL di Porto Tolle.

### Caratterizzazione del clima di moto ondoso e del regime anemologico

#### *Inquadramento climatico*

L'area deltizia appartiene alla Pianura Padana che ricade nella fascia climatica temperato-fredda. Tali condizioni sono, localmente, molto attenuate dalla presenza del mare, che tende a conferire alla zona caratteri climatici più mediterranei.

Durante l'inverno la pianura padana è un bacino di aria relativamente fredda, ad alta pressione, che sospinge i venti da Ovest verso Est sulla fascia costiera adriatica. Lo sporadico spostamento verso Sud Ovest, nei mesi invernali e primaverili, di queste alte pressioni, o la loro relativa attenuazione rispetto all'aria anticiclonica russo-asiatica, può dar via libera alla Bora, che è una caratteristica peculiare di questa fascia litoranea. Nell'estate, invece, la situazione termo-barometrica si inverte, determinando venti da est (Levante) o, più frequentemente, venti di sud est (il cosiddetto Scirocco).

Nell'area deltizia la temperatura scende al di sotto di 2°C in gennaio, e supera i 23°C in luglio; le escursioni termiche medie sono generalmente inferiori ai 22°C. I valori medi di precipitazione annua, che nell'entroterra delle provincie di Ferrara e Rovigo sono compresi tra i 650 e 700 millimetri, nell'area deltizia risultano inferiori ai 600 millimetri annui. In particolare è relativamente meno fre-

quente la neve. I massimi di piovosità autunnali e primaverili, tipici del resto della pianura, qui manifestano spesso la tendenza a concentrarsi nel periodo invernale, con scarsità di precipitazioni in primavera.

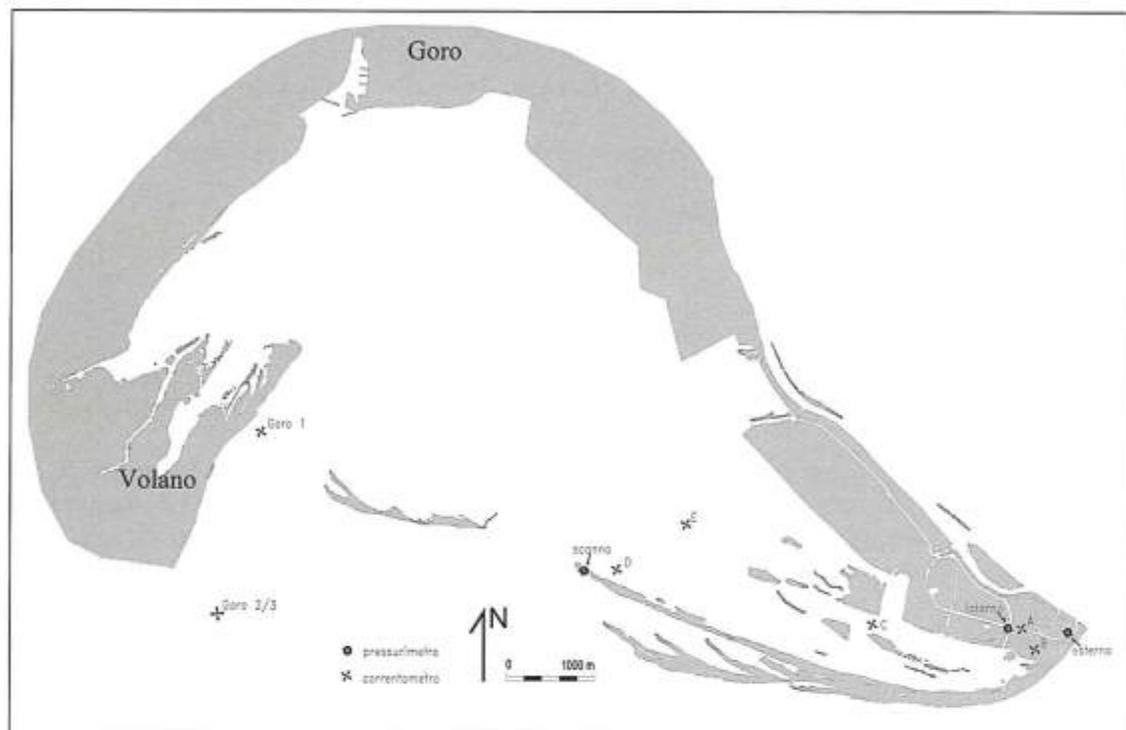


Figura 1 - Inquadramento geografico ed ubicazione delle stazioni di misura.

In tutta la Pianura Padana orientale l'umidità relativa è assai alta, scende sotto al 60% solo nei mesi di luglio e agosto, mentre è elevatissima nel periodo tra novembre e febbraio, ossia nei mesi in cui la notte è più lunga e si registra quindi, in condizioni anticicloniche, una più lunga permanenza d'aria fredda al suolo, con conseguente formazione di nebbie.

Nell'area costiera la stratificazione termica è frequentemente contrastata dal vento; d'altra parte l'umidità assoluta è maggiore. In definitiva si può ritenere che il numero annuale delle ore di nebbia sia più o meno uguale nell'entroterra e nella regione deltizia; ma, mentre nell'entroterra esse risultano concentrate soprattutto nei mesi invernali, nell'area costiera esse sono "diluite" in un periodo più lungo e si presentano soprattutto a tarda notte e al mattino.

Da tutti questi dati è possibile constatare la particolare caratterizzazione atmosferica dell'area deltizia, che può essere considerata come una vera e propria subregione climatica rispetto alla Pianura Padana.

### *Analisi anemologica*

Nello studio sul regime anemologico nel Delta del Po ed alla foce dell'Adige pubblicato da Calderoni (1982) si analizzano i dati forniti dall'anemografo posizionato sulla sommità del faro di Punta Maistra, nel periodo che va dal 1929 al 1943, ed i dati forniti dall'anemografo posizionato sul litorale di Rosolina Mare (Rovigo, a circa 22.5 km a Nord-Ovest del faro di Pila), nel periodo compreso tra il 1974 ed il 1977.

Da questo studio, considerando il regime anemologico alla foce del Po di Pila, emerge che nell'anno medio il vento di Nord-Est (Bora) è il più frequente (155.3‰), seguito dal vento di Sud-Est (Scirocco, 123.0‰) e da quello di Est (Levante, 116.4‰).

Nel periodo considerato, la massima velocità media viene fatta registrare da Bora (8.36 m/s), seguita da Levante (6.83 m/s), dal vento di Sud-Ovest (Libeccio, 5.77 m/s) e da quello di Sud (Ostro, 5.75 m/s). Risulta altresì che nell'anno medio il vento più frequente e più veloce è la Bora, che quindi viene considerata il vento dominante del paraggio.

In inverno la Bora è ancora il vento dominante (frequenza 52.4%, con massima velocità stagionale 10.09 m/s); essa è seguita, come frequenza, dal Maestro (42.8%), e, come velocità massima stagionale, da Levante (9.52 m/s).

In primavera il vento più frequente è lo Scirocco (42.7%) seguito da Levante (37.9%); le massime velocità stagionali vengono fatte registrare da Levante (7.45 m/s) e da Bora (7.28 m/s).

In estate il vento più frequente è Scirocco (45.4%) seguito da Ostro (35.1%); le massime velocità stagionali vengono fatte registrare da Libeccio (6.42 m/s) e da Bora (6.10 m/s).

In autunno il vento più frequente è la Bora (37.0%), seguita da Scirocco (26.4%); le massime velocità stagionali vengono fatte registrare da Bora (8.13 m/s) e da Levante (6.89 m/s).

L'Autore conclude affermando come sia molto significativo il fatto che, pur con strumenti, ubicazioni topografiche e diverse procedure di calcolo, si sia riscontrato nel paraggio un identico regime anemologico negli anni 1929÷1943 e 1974÷1977. Ciò induce a ritenere che, a partire perlomeno dal 1929, non siano intervenute significative variazioni del regime anemologico tali da comportare variazioni nel regime meteomarinario.

Idroser (1996) afferma che di grande influenza sullo stato del tempo nell'Adriatico centro-settentrionale sono le espansioni delle zone di alta pressione in prossimità della costa, per cui i venti dominanti sono quelli compresi tra Nord-Nordest ed Est (Bora), tra Est-Sudest e Sud-Sudest (Scirocco) e quelli di Nord-Ovest (Maestrale), in completo accordo con le osservazioni esposte precedentemente. I dati anemologici riportati in Idroser (1996) sono quelli relativi alle distribuzioni del vento rispetto alla direzione (16 settori di traversia di 22.5°) ed intensità (espressa in nodi), riferiti alla stazione dell'Aeronautica Militare presso Marina di Ravenna.

Il periodo di osservazione considerato va dal 1968 al 1977 ed, in pratica, comprende ed amplia il secondo periodo di osservazione considerato da Calderoni (1982).

E' altresì interessante considerare i dati anemologici forniti dalla Divisione Produzione della centrale Enel di Porto Tolle relativi alla stazione di rilevamento posta a Lido di Volano. I dati, sotto forma di medie orarie, estesi al periodo Luglio 1992 - Febbraio 1997, sono stati elaborati al fine di fornire le frequenze percentuali estese al periodo annuale (Fig. 2).

Si osserva come, anche in questi ultimi anni, il regime anemologico non sia sostanzialmente cambiato, mantenendo gli stessi settori prevalenti di provenienza: dai 260° ai 280° circa, con mode presenti anche nel settore da 130° a 160°.

Dalle Figure 3, 4 e 5 emerge, inoltre, una spiccata stagionalità del clima anemologico. Nel periodo estivo i venti sono maggiormente distribuiti e non presentano picchi di velocità predominanti, fatta eccezione per il settore di sud-est (Scirocco). Nel periodo invernale i venti con maggior velocità sono tipicamente concentrati in un settore di provenienza delimitato dalla Bora (nord-est) e dallo Scirocco (sud-est).

### *Clima di moto ondoso*

Nell'Alto Adriatico vi è una relativa abbondanza di dati di moto ondoso, per quanto tutte le fonti presentino carenze di varia natura (Idroser, 1996).

I dati di seguito esposti sono stati, in buona parte, ricavati dai piani di protezione e riqualificazione delle coste, messi a punto dalla Idroser (1994, 1996) per conto della Regione Emilia-Romagna.

Le registrazioni del moto ondoso possono provenire da tre differenti fonti: piattaforme off-shore di perforazione AGIP, osservazioni raccolte dalle navi in transito (KNMI) e misure raccolte da stazioni di Enti vari (ENEL, CRIS e Servizio Idrologico).

Nel tratto di mare in esame vi sono registrazioni dell'altezza d'onda (risoluzione di circa 30 cm) e della direzione di provenienza (risoluzione di 22.5°) provenienti dalle piattaforme AGIP Ada, Gari-

baldi A, Amelia, PCB, Annabella, Barbara C, Barbara A e Clara. Purtroppo la durata di quasi tutte le serie temporali è limitata a meno di un anno e ciò impedisce una caratterizzazione statistica significativa del clima di moto ondoso.

Unica eccezione è rappresentata dalle registrazioni (periodo 1971-1983) effettuate sulla piattaforma PCB, situata al largo di Ravenna (coordinate  $44^{\circ}23'16.9''N$  e  $12^{\circ}34'29.2''E$ ) su un fondale di 25 m.

La sua banca dati fornisce misure di intensità e direzione del vento per tutto il periodo, osservazioni di altezza d'onda con frequenza giornaliera per gli anni 1974, 1975 e 1980 (totale di 5700 dati), misurazioni di altezza e periodo dell'onda per la durata di circa un anno (registrazioni giugno 1971-maggio 1972).

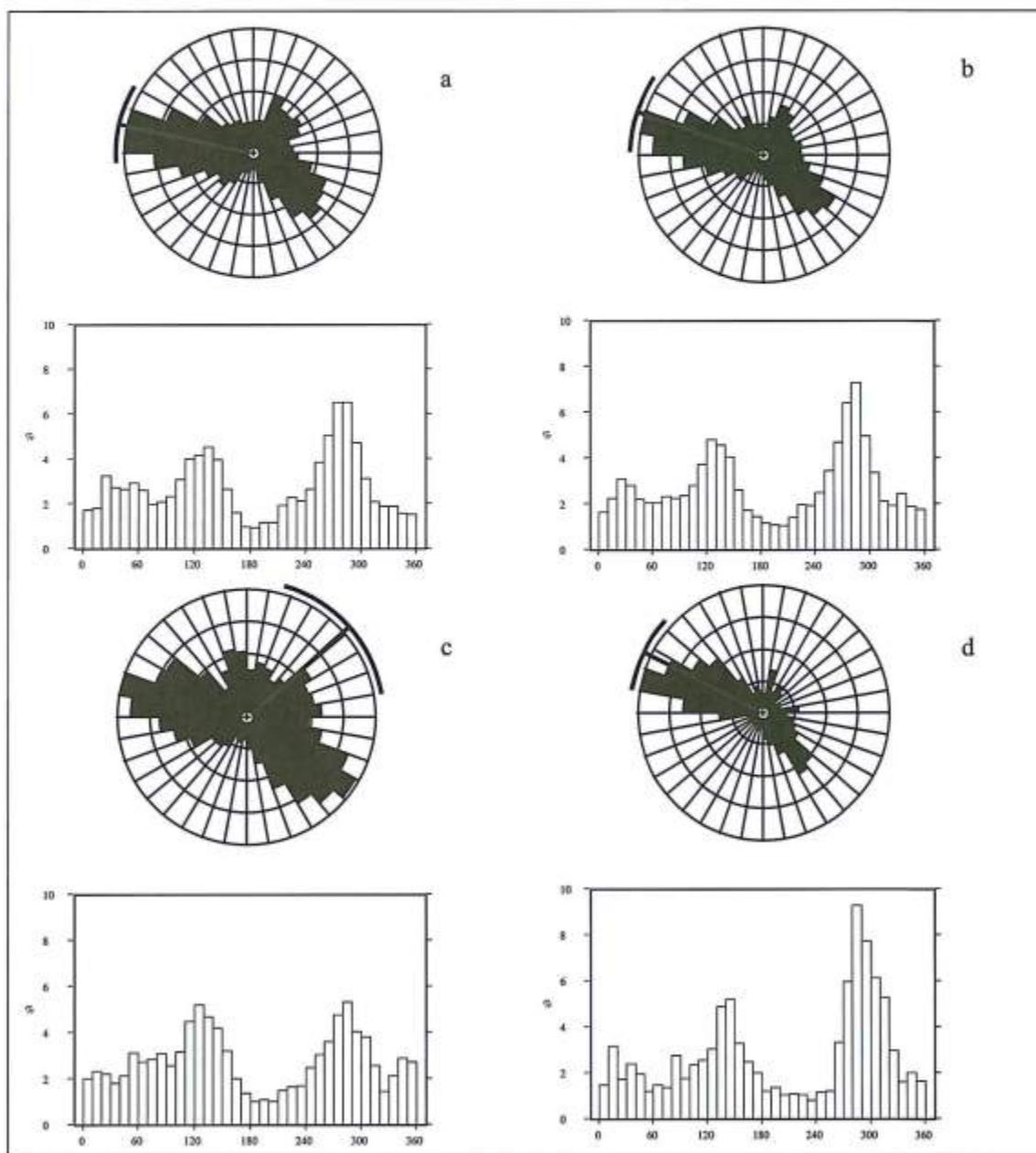


Figura 2 - Frequenze percentuali delle direzioni di provenienza dei venti per gli anni 1994 (a), 1995 (b), 1996 (c) e 1997 (d).

I dati KNMI, ricavati da osservazioni visuali svolte dalle navi in transito e raccolte dal servizio meteorologico olandese, forniscono l'altezza d'onda osservata (risoluzione di 50 cm) e la sua direzione (precisione di  $10^\circ$ ). Le osservazioni coprono un periodo di circa 30 anni, ma sono condensate lungo le rotte di navigazione: ciò comporta una preliminare operazione di scelta ed adattamento in modo da rendere i dati non solo temporalmente ma anche spazialmente omogenei. Infine le osservazioni strumentali effettuate dall'ENEL, CRIS e Servizio Idrologico pur riferendosi alla stazione di Porto Tolle, nel delta del Po, risultano poco idonee perché non direzionali.

Idroser (1994 e 1996) suggerisce che il clima di moto ondoso più significativo per la caratterizzazione della dinamica litoranea dell'Emilia-Romagna sia quello fornito dalla piattaforma PCB. Inoltre l'ubicazione della piattaforma permette di assumere che le onde misurate si trovino, per situazioni normali, in condizioni di mare profondo, quindi non modificate da rifrazione o *shoaling*.

Se si confrontano le registrazioni del periodo 1971-80 con quelle del 1971-83 (Fig. 6), risulta evidente che nel secondo periodo vi è stata maggiore frequenza degli eventi da levante e dai settori da W-NW ed una minore degli eventi da Scirocco (SE) e da Bora (NE). Lo studio dell'Idroser (1996) conclude che questi ultimi tre anni di osservazioni siano anomali, per cui nel Piano Coste sono stati utilizzati solo quelli del periodo 1971-80.

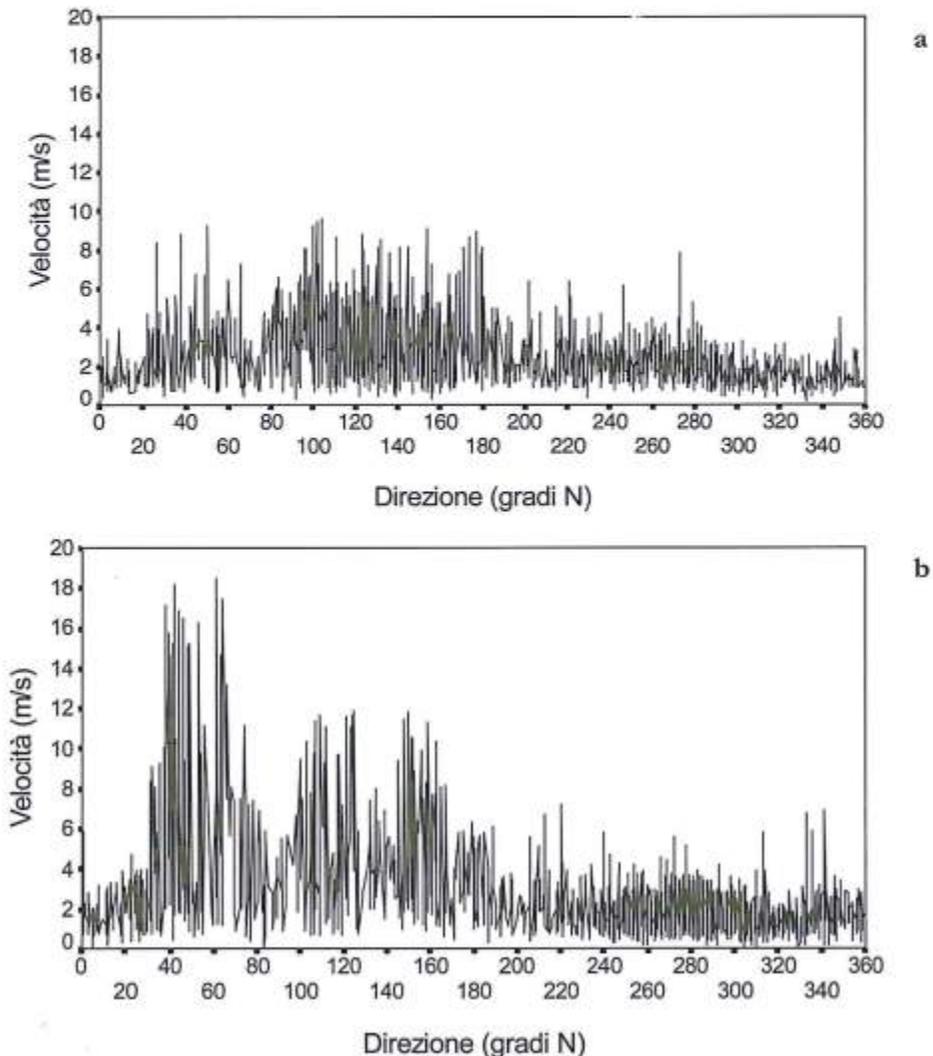


Figura 3 - Diagrammi dei venti per i periodi luglio-settembre 1992 (a) e ottobre-dicembre 1992 (b).

I dati registrati dalla piattaforma PCB possono essere utilizzati per la ricostruzione del moto ondoso nell'area della Sacca di Goro, poiché i regimi anemologici sono comparabili. Tuttavia, la particolare orientazione della linea di riva impone l'uso di opportune modifiche ai dati PCB. Ciò ha indotto l'Idroser (1996) a calcolare il moto ondoso, riferito ad un punto (Fig. 7) a sud della Sacca (coordinate 44°46'00"N e 13°18'30"E), tenendo in considerazione il fetch efficace e prevedendo l'altezza d'onda significativa per ogni direzione in funzione dell'intensità del vento.

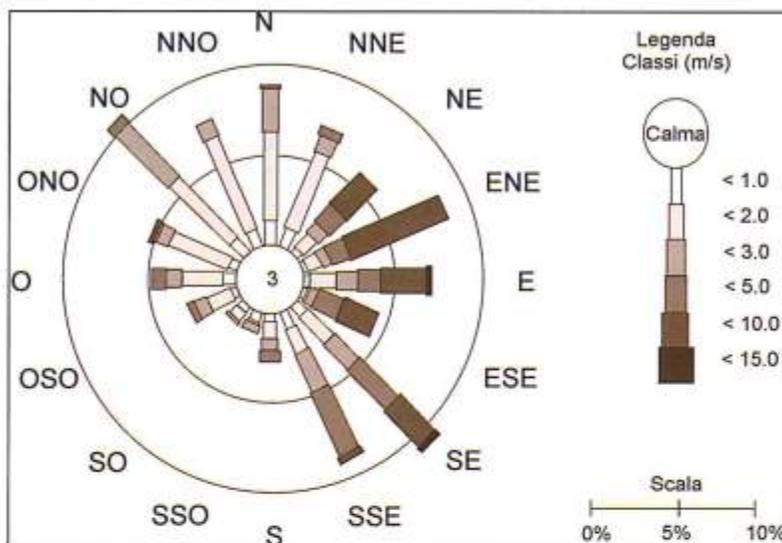


Figura 4 - Distribuzione dell'intensità e frequenza dei venti nel Ottobre 1997 (per gentile concessione ENEL Porto Tolle).

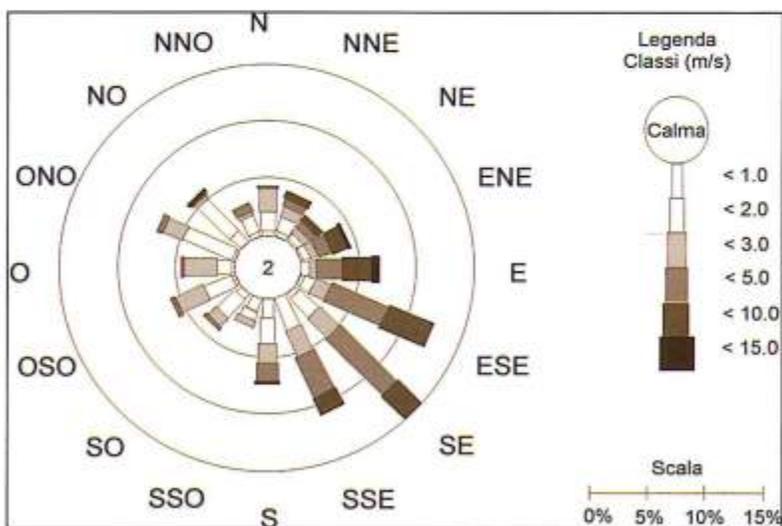


Figura 5 - Distribuzione dell'intensità e frequenza dei venti nel Maggio 1998 (per gentile concessione ENEL Porto Tolle).

Come evidenziato dall'Idroser (1996) comparando i fetch efficaci del sito PCB con la Sacca di Goro, quest'ultima è relativamente protetta dai settori di Bora, risultando principalmente esposta al settore di Scirocco (Fig. 7). Risulta interessante notare come, in base alla frequenza assoluta, la moda principale abbia direzione NW (13.10 %) pur presentando fetch ristretto, mentre a quella secondaria (SE, 11.05%), dove il fetch è molto più ampio, si debba ascrivere un moto ondoso considerevole.

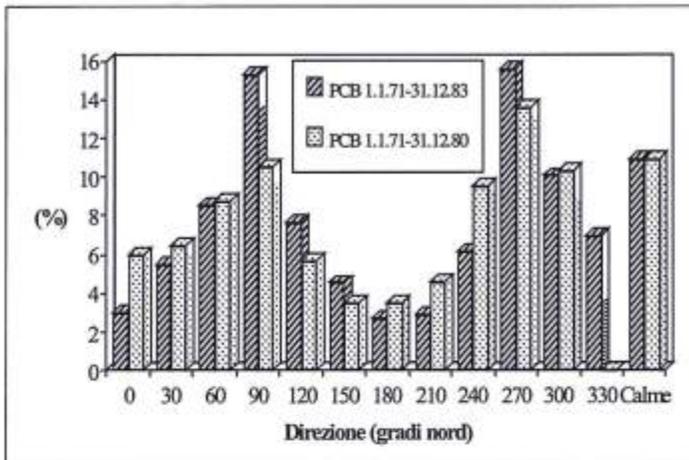


Figura 6 - Frequenza e direzione dei dati registrati dal 1/1/1971 al 31/12/1983 dalla piattaforma PCB (da Idroser, 1996).

Va però rammentato che il clima di agitazione del moto ondoso, rappresentato nella Figura 7, è stato ricavato in base alla sola distribuzione di frequenza assoluta degli eventi e quindi non rispecchia la loro magnitudine.

Per la protezione offerta dalla prominenza del delta del Po, generalmente le onde che investono la Sacca hanno altezze molto ridotte ed una provenienza compresa tra i 60° ed i 120° (75% delle frequenze), con una frequenza totale delle calme del 17.25%. Per evidenziare la distribuzione direzionale delle altezze d'onda i dati sono stati suddivisi in quattro classi di frequenza e rappresentate tramite diagrammi (Fig. 8). Questi ultimi mettono in evidenza rispettivamente eventi a bassa energia (altezza significativa  $\leq 0.5m$ ) che presentano una frequenza complessiva molto alta (68.05%); media energia (tra 0.5-1m e 1-1.5m) che hanno una frequenza del 12.7%; alta energia (altezza significativa  $> 1.5m$ ) che hanno però bassa frequenza (circa il 2% del totale).

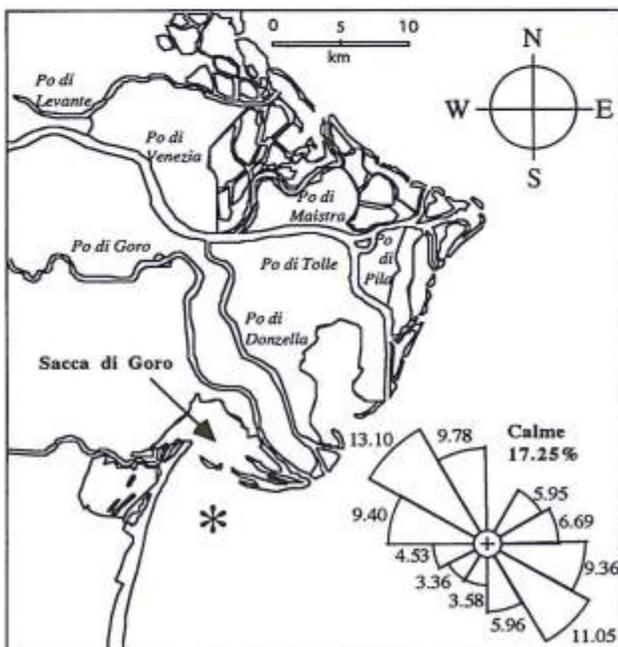


Figura 7 - Clima di agitazione del moto ondoso riferito al punto evidenziato dall'asterisco, ricostruito dalla Idroser (1996) tramite estrapolazione dei dati della piattaforma PCB (periodo 1.1.71-31.12.80).

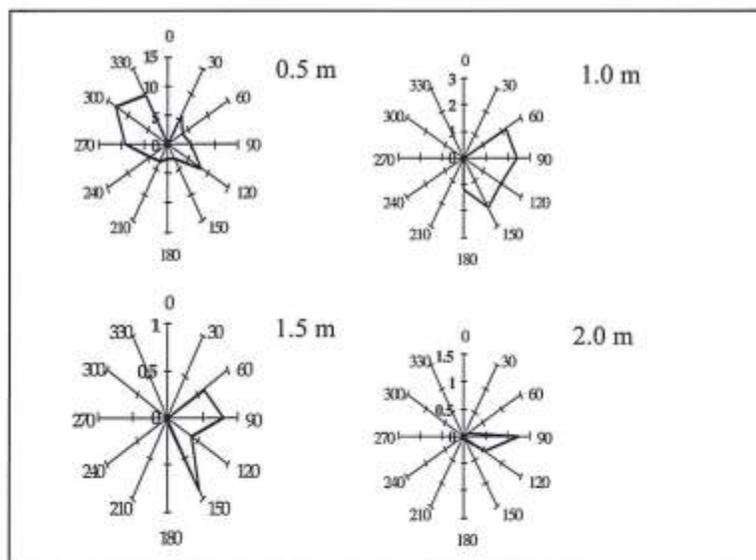


Figura 8 - Distribuzione di frequenza direzionale delle altezze d'onda a sud della Sacca di Goro (da Idroser, 1996).

Dai diagrammi si può notare come le onde a bassa energia ( $H_s < 0.5$  m) presentino un ampio spettro di provenienza, con due mode poste a  $120^\circ\text{N}$  e  $300^\circ\text{N}$ . Quest'ultimo moto ondoso, dovuto ai venti di Maestrale, non deve essere trascurato per l'alta frequenza degli eventi. Il moto ondoso a media energia ( $H_s 0.5\text{-}1.5$  m) proviene esclusivamente dal settore  $60^\circ\text{-}150^\circ\text{N}$  (venti di Bora, Levante e Scirocco) e presenta un fetch efficace estremamente lungo. Infine i rari eventi ad alta energia ( $H_s > 1.5$  m) provengono esclusivamente dal settore  $90^\circ\text{-}120^\circ\text{N}$ ; lo studio condotto dall'Idroser ipotizza una frequenza di 0.05% e direzione  $90^\circ\text{N}$  per onde con un'altezza di 4.5m, considerate come massimo evento.

Poiché stabilire relazioni statistiche tra altezza d'onda e periodo sulla base di osservazioni visuali (clima KNMI) presenta alcune difficoltà, quest'ultime sono state confrontate con quelle provenienti dalle piattaforme AGIP (Idroser, 1994, 1996), con particolare attenzione ai dati della PCB e Annabella. Lo studio ha stabilito che il clima PCB presenta nei settori di Bora ( $330^\circ\text{-}75^\circ\text{N}$ ) e Scirocco ( $75^\circ\text{N}\text{-}165^\circ\text{N}$ ) onde più ripide rispetto alla piattaforma Annabella. Operativamente per definire il periodo delle onde al largo della Sacca di Goro (Fig. 9) l'indagine ha privilegiato il clima della piattaforma PCB, per mantenere una certa uniformità di analisi.

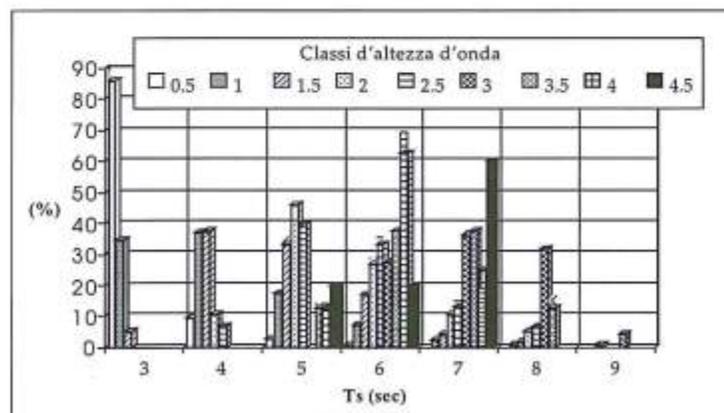


Figura 9 - Relazione tra classi di altezza d'onda significativa (in metri) e periodo significativo (in secondi) dai dati PCB 1.9.1971-31.05-1972 (da Idroser, 1994).

Dalla distribuzione direzionale delle frequenze delle altezze d'onda (dati PCB modificati da Idroser, 1996) è possibile ottenere una densità di energia totale per settore di provenienza (Fig. 10), ponderando i vari apporti energetici, in funzione della frequenza di apparizione di una determinata altezza d'onda all'interno del settore di provenienza considerato.

L'istogramma evidenzia come buona parte dell'energia del moto ondoso è collegabile ad onde con direzione tra i 60° ed i 150°N.

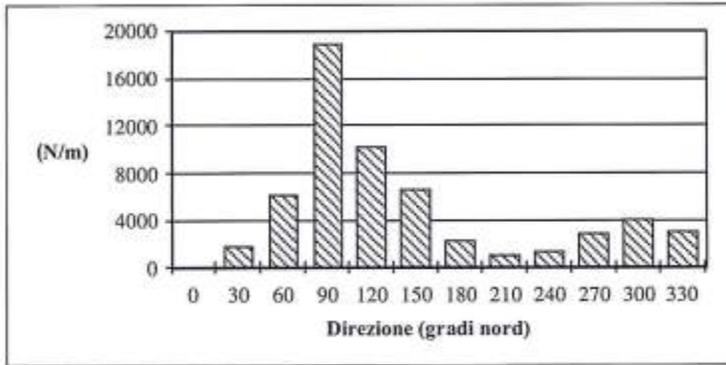


Figura 10 - Densità di energia totale per settori di traversia secondo i dati PCB modificati da Idroser (1996) riferiti alla Sacca di Goro.

Il flusso di energia rappresentato in Figura 11 è stato, invece, ottenuto utilizzando le lunghezze d'onda calcolate usando i periodi significativi modal:

$$P = E_{tot}Cn \quad [1]$$

dove  $E_{tot}$  è la quantità di energia totale (Newton/metro),  $C$  è la velocità di fase dell'onda assumendo condizioni di mare profondo ed  $n$  è il rapporto tra velocità di gruppo e velocità di fase (equivalente in mare profondo a 0.5);  $E_{tot}$  è stata calcolata secondo la notazione:

$$E_{tot} = 0.125\rho gH_s^2 \quad [2]$$

dove  $\rho$  è la densità dell'acqua marina,  $g$  è la costante gravitazionale e  $H_s$  è l'altezza d'onda; mentre  $C$  è stata calcolata tramite la relazione:

$$C = (gL/2\pi)^{1/2} \quad [3]$$

dove la lunghezza d'onda in mare profondo ( $L$ ) è data da  $L = 1.56T^2$ , in cui  $T$  rappresenta il periodo significativo che deve essere associato ad una particolare altezza d'onda.

L'istogramma (Fig. 11) evidenzia come la maggior parte del flusso di energia provenga tra Bora e Scirocco. Tuttavia non va dimenticato che nel settore di Maestrale l'elevata frequenza del moto ondoso con  $H_s \leq 0.5$  m può incidere sulla dinamica evolutiva dello Scanno, specialmente nella sua parte lagunare.

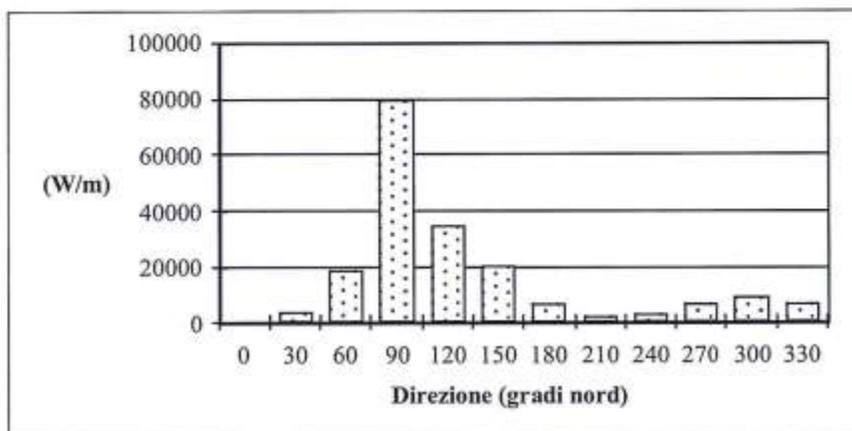


Figura 11 - Flusso di energia proveniente dai vari settori di traversia in Watt/metro di cresta d'onda.

### Caratterizzazione dei flussi di marea attraverso il canale principale della Sacca

Durante i rilievi effettuati sono stati utilizzati tre correntometri ad elica costruiti dalla Sensordata (Bergen, Norvegia), modello SD-6000. Una prima campagna di misure è stata effettuata nel Maggio 1997, ubicando due strumenti nelle stazioni Goro-1 e Goro-2 (vedi Figura 1 per la loro ubicazione). Una seconda campagna di misure è stata svolta nel Maggio 1998, installando un SD-6000 nella stazione Goro-3, mentre un modello meno recente è stato installato nella stazione Goro-4. Per tutta la durata della campagna si è installato anche un trasduttore di pressione DAS TL2 per la misura del livello di marea.

#### *Canale navigabile bocca principale lato Volano (Stazione Goro-1)*

I dati relativi al regime anemologico (direzione di provenienza e velocità – espressa in m/sec – dei venti), per l'intervallo 24-26 maggio 1997 (periodo di misura di tale stazione), sono indicati in Figura 12. E' altresì indicato, in Figura 13, per lo stesso periodo, l'andamento dell'altezza d'onda significativa. Si noti che il periodo considerato nei diagrammi di Figure 12 e 13 è compreso tra il 24 maggio 1997 ed il 28 maggio 1997, in modo tale da evidenziare i regimi meteomarinari anche per la stazione Goro 2.

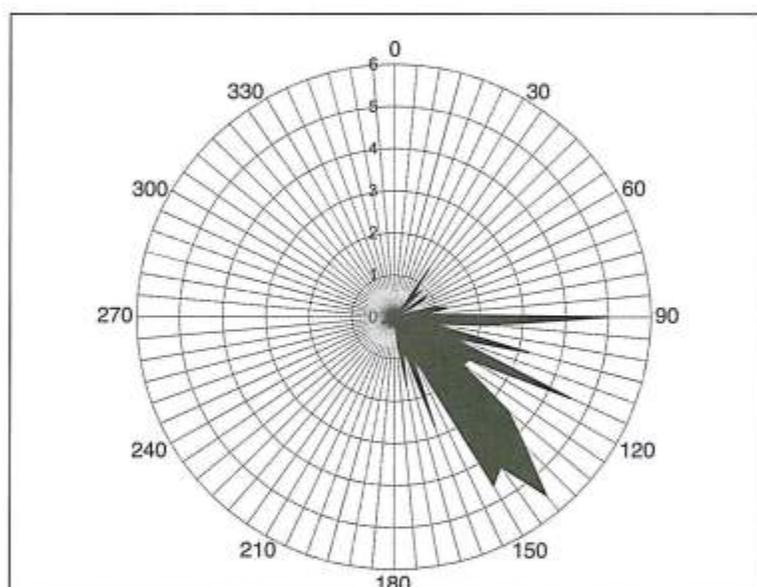


Figura 12 - Direzione di provenienza e velocità dei venti (in m/sec) registrate a Lido di Volano nel periodo 24-28 maggio 1997.

Come evidente in Figura 12, il regime anemologico per il periodo considerato è perfettamente conforme con quanto ricavato da Calderoni (1982) per la stagione primaverile. Dal confronto tra velocità dei venti ed altezze d'onda (Fig. 13) su scala temporale è stato, inoltre, possibile determinare una buona correlazione tra le due variabili. E', quindi, ragionevole ipotizzare che gli eventi d'onda con maggior altezza significativa abbiano direzione di provenienza concorde con quella dei venti che, nello stesso intervallo di tempo, denotano le maggiori velocità.

I dati di temperatura, velocità e direzione della corrente sono riassunti nella Tabella 2, per ciò che riguarda i valori minimi, massimi, medi e la deviazione standard osservati.

Le variazioni della temperatura della massa d'acqua al variare della curva di marea, registrata dal trasduttore di pressione installato sulla lanterna di fronte a Lido di Volano, sono presentate in Figura 14.

Si evidenzia come in fase di riflusso vi sia un aumento di temperatura, che poi si mantiene costante ai lati del punto di minimo della curva di marea. Ciò può essere dovuto alla diminuzione della profondità della colonna d'acqua (il sensore si trova man mano più vicino alla superficie) ed al flusso di acqua più calda dalle parti più interne della laguna.

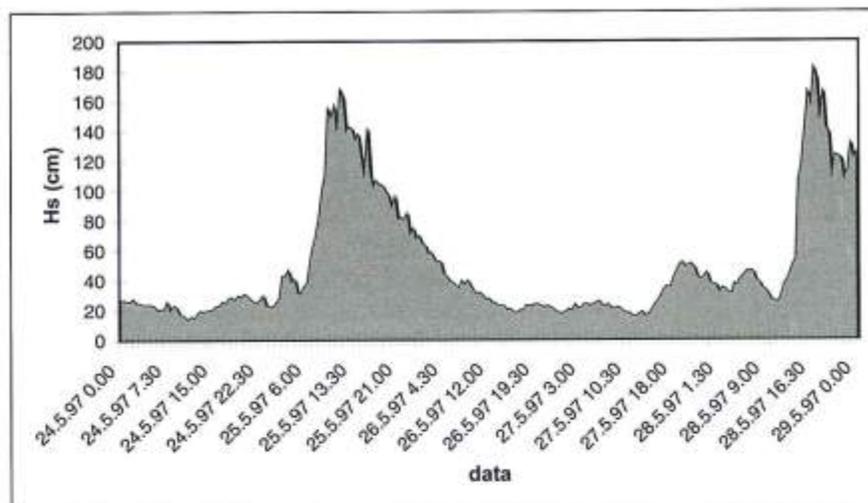


Figura 13 - Andamento dell'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) nel periodo 24-28 maggio 1997, ricavato dai dati (non direzionali) disponibili per la piattaforma Agip PCB.

Il flusso di acqua da mare porta, invece, ad un successivo raffreddamento della massa d'acqua. Il fenomeno avviene solo durante l'armonica principale della curva di marea e non durante quella secondaria.

Tabella 2 - Dati statistici sulla serie temporale misurata dal 24 al 26 maggio 1997.

Parametro	Minimo	Massimo	Valore medio	Deviazione Standard
Temperatura (C°)	18.6	23.6	20.8	1.0
Velocità corrente (cm/sec)	0.6	42	13.3	12.5
Direzione corrente (gradi N)	2	360	145	104

Il secondo grafico in Figura 14 mette in relazione la direzione e la velocità della corrente. Esistono due mode nella distribuzione dei dati di direzione: una corrispondente ad una direzione 20°N (flusso di entrata) ed una diametralmente opposta a circa 200°N (flusso di uscita). La corrente di marea gira rapidamente, invertendo direzione e poi stabilizzandosi ai lati del massimo picco nella curva di velocità.

I valori di velocità presentano una certa simmetria tra il flusso ed riflusso, come si può osservare chiaramente in corrispondenza della bassa marea del 24 Maggio 1997 (ore 05:44). In tale occasione valori di velocità di oltre 40 cm/sec erano misurati sia in fase di flusso che di riflusso. L'analisi della componente residuale dei dati di corrente indica una direzione di 34° N, con bassa stabilità direzionale (parametro di Neumann=0.163), quindi diretta verso le parte più interne della Sacca in direzione NE. Tale indicazione comporta un afflusso netto di acqua marina lungo questa direzione, almeno nel punto di misura.

Si può concludere che da un punto di vista idraulico il canale di accesso al Porto di Goro, nel punto di installazione dello strumento, esercita un controllo abbastanza netto sulle caratteristiche di circolazione della massa d'acqua. Avendo una sezione abbastanza stretta e profonda, canalizza facilmente sia il flusso in entrata sia in uscita. Le alte velocità osservate confermano una tendenza alla sovraescavazione del canale, con approfondimento in argille sovraconsolidate, così come osservato da immersioni in loco.

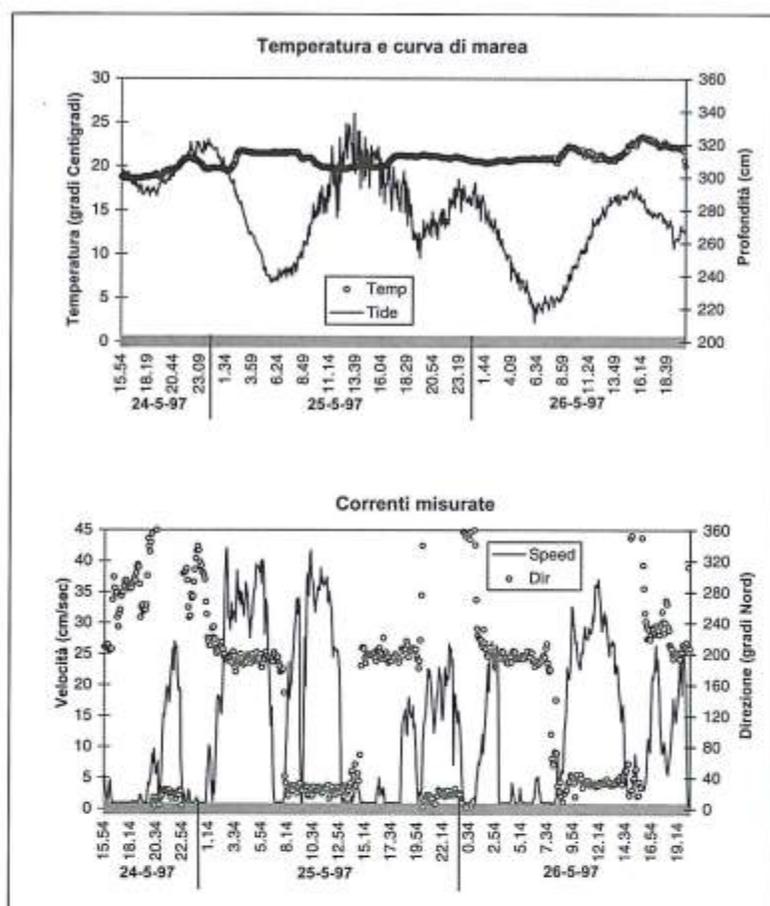


Figura 14 - Dati di temperatura e corrente misurati alla stazione Goro-1 (24-26 Maggio 1997).

### Lanterna di segnalazione di fronte al Lido di Volano (stazioni Goro-2 e Goro-3)

Per il regime anemologico e l'andamento dell'altezza d'onda significativa relative alla stazione Goro-2 si confrontino le Figure 12 e 13. Anche in questo caso, verificata l'evidente relazione tra velocità del vento ed altezza d'onda significativa, si possono assumere concordi le direzioni di provenienza di venti ed onde. La Tabella 3 riassume le caratteristiche delle serie temporali di temperatura, velocità e direzione della corrente osservate nel periodo 24-28 Maggio 1997, nella stazione Goro-2.

Tabella 3 - Dati statistici sulla serie temporale misurata dal 24 al 28 maggio 1997.

Parametro	Minimo	Massimo	Valore medio	Deviazione Standard
Temperatura (C°)	18.6	22.5	20.8	0.9
Velocità corrente (cm/sec)	1.0	35.2	11.5	6.3
Direzione corrente (°N)	133	197	171	14

E' interessante osservare come dal punto di vista termico la massa d'acqua si comporta in maniera analoga alla stazione di Goro 1 (Fig. 14). Il valore medio osservato e lo scostamento da questo, espresso dalla deviazione standard della serie, sono perfettamente coincidenti.

La serie temporale delle correnti misurate si rileva invece molto diversa dalla precedente Figura 14. Innanzi tutto va fatto osservare come il correntometro non abbia mai registrato un valore inferiore ad 1 cm/sec. Nonostante sia possibile credere che nella stazione di misura non si verifichi mai una fase di stanca totale della marea, sembra lecito domandarsi perché la corrente non rallenti mai al di

sotto di un valore sempre uguale ad 1 cm/sec. Tale anomalia potrebbe essere imputabile ad una cattiva calibrazione dello strumento. Il valore massimo registrato dell'intensità della corrente è minore rispetto alla stazione precedente, per quanto la minore deviazione standard confermi una tendenza, osservabile anche nel grafico in Figura 16, a repentine variazioni di velocità. La maggiore irregolarità del grafico deriva dall'ubicazione dello strumento in una zona che risente maggiormente del moto ondoso del Mare Adriatico (esterna alla Sacca).

La dispersione direzionale dei dati di corrente è bassissima: nel grafico di Figura 15 non si osservano nette inversioni di provenienza della corrente. L'analisi della sua componente indica un valore di  $172^\circ$  N, quindi praticamente coincidente con la media aritmetica della serie temporale. Il vettore di corrente residuale ha inoltre una bassissima dispersione direzionale (parametro di Neumann=0.981).

Dai dati raccolti sembra che tale zona sia dominata dalla corrente di riflusso, per quanto un tale comportamento idraulico è più simile a quello teorico di una bocca d'estuario, piuttosto che a quello esterno di una bocca lagunare.

Per un'ulteriore verifica fu deciso di effettuare una nuova serie di misure nella stazione Goro-3 (21-29 Maggio 1998). A tale scopo è stato utilizzato un SD-6000 nuovo di fabbrica, per minimizzare eventuali problemi di calibrazione dovuti ad usura dello strumento.

In Figura 16 viene riportato il regime anemologico per il periodo 21-29 maggio 1998, registrato presso la centralina meteorologica posta a Lido di Volano. Per tale periodo non è possibile indicare l'andamento dell'altezza d'onda significativa a causa dell'attuale indisponibilità dei dati.

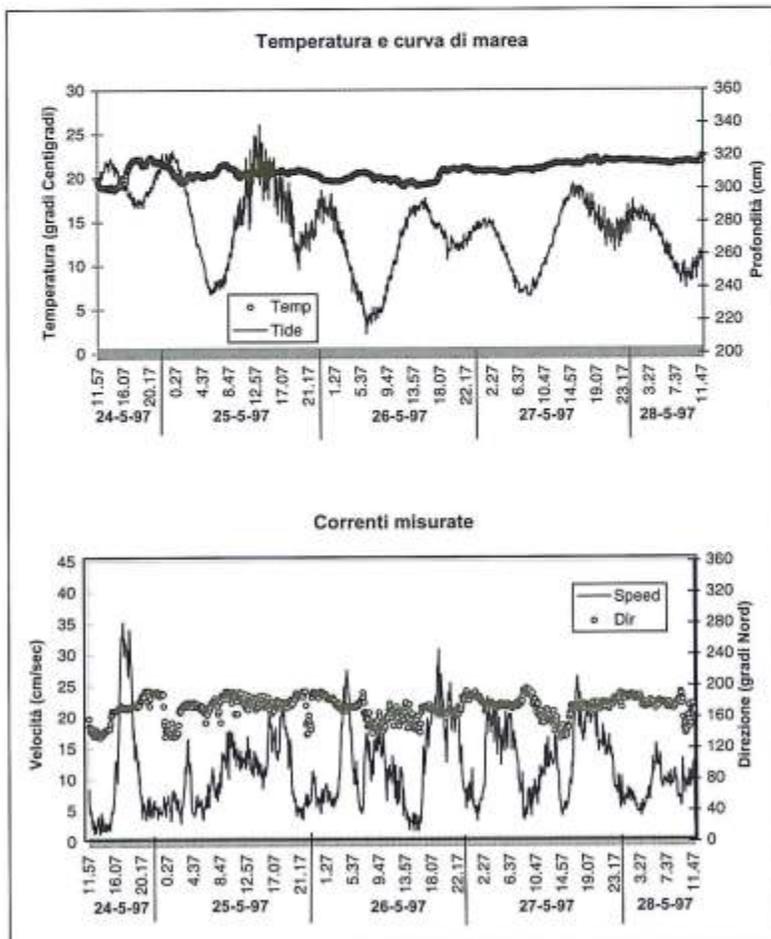


Figura 15 - Dati di temperatura e corrente misurati alla stazione Goro-2 (24-28 Maggio 1997).

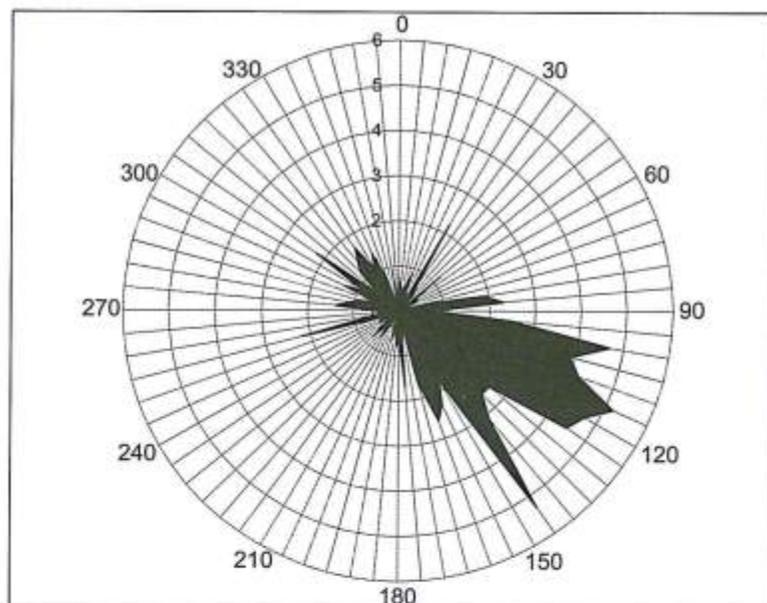


Figura 16 - Direzione di provenienza e velocità dei venti (in m/sec) registrate a Lido di Volano nel periodo 21-29 maggio 1998.

Tabella 4 - Dati statistici sulla serie temporale misurata dal 21 al 29 maggio 1998.

Parametro	Minimo	Massimo	Valore medio	Deviazione Standard
Temperatura (C°)	18.1	21.9	20.1	0.9
Velocità corrente (cm/sec)	0.4	47.2	8.4	7.1
Direzione corrente (°N)	0	360	174	100

La Tabella 4 presenta i risultati sintetici di questa campagna di misure.

Si nota immediatamente la perfetta coincidenza dei range di temperatura misurati, per quanto nella campagna dell'anno precedente i valori massimi fossero leggermente superiori, probabilmente perché le condizioni atmosferiche erano migliori e vi era stato un lungo periodo di bel tempo. Durante la campagna della stazione Goro-3 si è invece verificata una certa variabilità, con diversi giorni di cielo coperto.

I valori di velocità osservati raggiungono un picco di 47.2 cm/sec alle ore 1:03 del 24 maggio 1998, corrispondente ad una direzione di 176° N, cioè al riflusso di marea uscente in direzione Sud. Dall'esame della Figura 17 che correla il campo di velocità con la distribuzione direzionale dei dati raccolti, si vede chiaramente la presenza di due mode direzionali: una a circa 20° N, corrispondente al flusso di marea entrante, ed una localizzata a circa 180° N, corrispondente al riflusso di marea uscente. In realtà, il passaggio tra i due estremi si rivela molto graduale, e la presenza di direzioni sparse nell'arco di 360° potrebbe confermare l'influenza del moto ondoso o del vento nel generare correnti esterne alla marea stessa.

Da un esame più attento del campo di velocità si osserva inoltre che tutti i picchi della curva corrispondono alla fase di marea uscente, essendo praticamente coincidenti con il punto di bassa marea osservato dal trasduttore di pressione installato sulla lanterna. Altro fattore di rilievo è il fatto che la media aritmetica dei dati direzionali corrisponde a 174° N, praticamente uguale a quella misurata dalla stazione Goro-2. L'analisi del residuo di corrente di marea identifica una direzione di 185° N, anche questo vicino al valore calcolato per la stazione dell'anno prima, per quanto la dispersione direzionale risulta maggiore, avendo un parametro di Neumann di 0.516. Si può quindi concludere

che, indipendentemente dai problemi di calibrazione dello strumento riscontrati durante la campagna del maggio 1997, vi è coerenza tra i data sets Goro-2 e Goro-3.

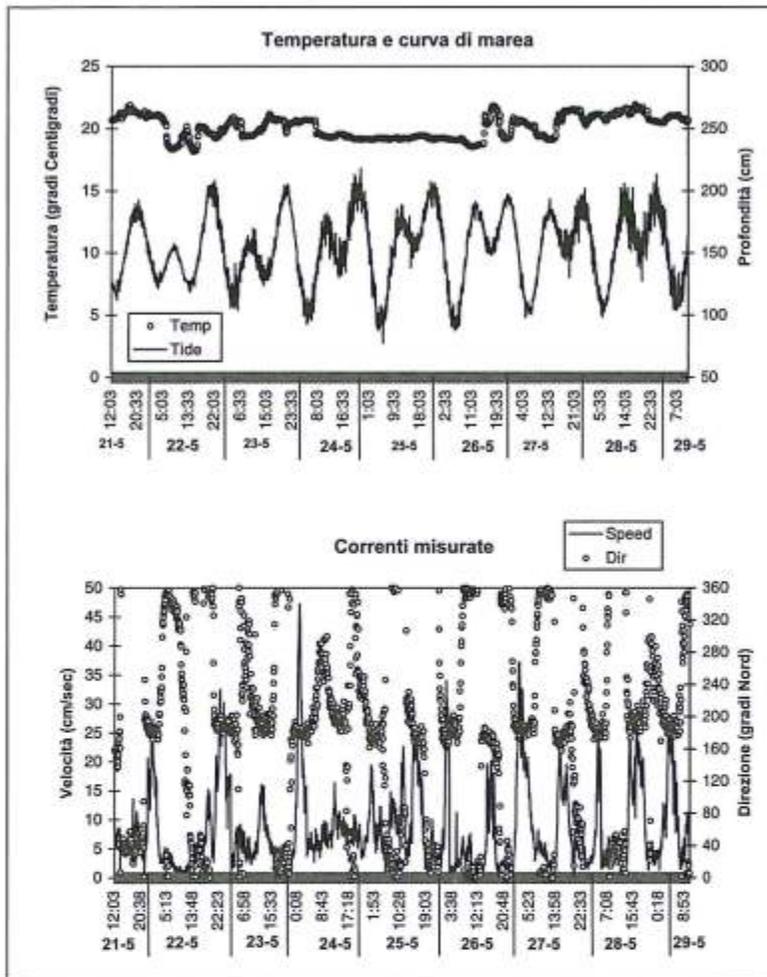


Figura 17 - Dati di temperatura e corrente misurati alla stazione Goro-3 (21-29 Maggio 1998)

La zona di mare studiato risulta dominata dal riflusso di marea, con una componente residuale diretta verso Sud. Il flusso non si può considerare 'canalizzato' come nel caso della stazione Goro-1, per quanto il fondale si presenta sabbioso e manchino forme di fondo. La posizione della stazione esposta a tutto il quadrante del moto ondoso che interessa la zona lascia intuire l'importanza del moto ondoso e di correnti generate dal vento nel determinare una circolazione secondaria alquanto variabile.

#### Caratterizzazione della circolazione nella parte interna della Sacca

Nell'ambito dello studio idrodinamico della circolazione nella Sacca di Goro sono state realizzate due campagne di misura sistematica dei livelli per la caratterizzazione delle oscillazioni di marea e dei ritardi tra il mare esterno e la sacca. Sono state, inoltre, effettuate misure correntometriche e delle caratteristiche delle masse d'acqua entro i canali nella parte centro-orientale della Sacca.

Le campagne sono state progettate per la misura simultanea dei dati di marea in tre punti posti nella zona di interesse: al faro della foce del Po di Goro (denominata ESTERNO), all'idrovora posta sul lembo occidentale dello scanno poco prima della bocca secondaria (denominata SCANNO) e all'interno della sacca, presso la chiavica "due luci" del sistema di fitodepurazione (denominata INTERNO).

L'ubicazione dei punti di misura è riportata in Figura 1. L'area è stata indagata con l'ausilio di quattro strumenti, analoghi fra loro, ma diversi nel funzionamento e nel tipo di grandezza misurata. Sono stati utilizzati due trasduttori di pressione DAS TL1 e TL2 (range di misura: 1 Atm) a funzionamento piezoresistivo, un pressurimetro a bubulazione (OTT Orphimedes, range di misura 1 Atm) ed un mareografo a galleggiante (OTT Thalimedes).

La prima campagna si è svolta nei mesi di Marzo e Aprile 1999. Per primo è stato posizionato un trasduttore di pressione alla chiavica posta ad ovest del Faro (Stazione ESTERNO). Quindi è stato posizionato il mareografo sull'Idrovora sullo Scanno di Goro (Stazione SCANNO). Infine si è proceduto al posizionamento del pressurimetro a bubulazione alla chiavica interna alla Sacca (Stazione INTERNO). Per ogni installazione è stato evidenziato e marcato un punto di origine, che è stato poi successivamente rilevato tramite misura GPS di precisione, in modo da conoscere il medesimo riferimento in quota per tutte e tre le stazioni. Al recupero di tutti gli strumenti è stato controllato che non fossero intercorse manomissioni, soprattutto a danno delle quote delle sonde e dei galleggianti degli strumenti, che potessero invalidare o rendere dubbi i dati registrati.

I periodi e le condizioni di misura, per intervenute problematiche di carattere tecnico e atmosferico, sono stati tali che le uniche sovrapposizioni tra due strumenti si sono avute nel periodo dal 6 al 14 aprile (tra ESTERNO e SCANNO) e nel periodo dal 14 al 20 aprile (tra SCANNO e INTERNO).

Per ovviare ai problemi di simultaneità e di rappresentatività dei dati è stata quindi svolta un'ulteriore campagna di misura nel mese di maggio 1999, nel periodo sizigiale a cavallo della luna piena del 15 del mese, nella quale sono state realizzate, oltre alle misure mareografiche, anche misure correntometriche, da cui poter eventualmente dedurre dati di deflusso scambiato tra l'interno e l'esterno della Sacca.

La disponibilità degli strumenti è variata rispetto alla prima campagna. Sono stati utilizzati, allo scopo di ottenere misure dei livelli idrometrici, nelle stazioni ESTERNO ed INTERNO due trasduttori di pressione, mentre nella stazione SCANNO si è ubicato il pressurimetro a bubulazione.

Nel corso della medesima campagna sono stati realizzati dei profili correntometrici nelle stazioni ubicate in Figura 1 (stazioni A, B, C, D ed E) con uno strumento multisonda ANDERAA RCM 9 equipaggiato con un correntometro doppler avente come range di velocità 0-300 cm/s e di direzione 0-360°, un sensore di pressione piezoresistivo, un sensore di temperatura termoresistivo, un conduttivimetro a cella di induzione ed un sensore di torbidità (OBS).

### *Analisi dei dati mareografici*

L'esame dei dati di marea registrati è stato rivolto principalmente alla determinazione del ritardo con cui l'onda tidale si presenta allo scanno e all'interno della sacca, rispetto al punto esterno posto alla foce del Po di Goro.

Le misure effettuate nella primavera del 1999 sono state in parte condizionate dall'interconnessione idrodinamica tra l'interno della sacca e la foce del Po di Goro a mezzo dell'area di fitodepurazione. Nella campagna di aprile, le chiaviche che regolano gli afflussi verso l'area di fitodepurazione erano state già aperte, mentre nella campagna di maggio, il nuovo canale principale che unisce la bocca secondaria alla zona del faro risultava già parzialmente realizzato.

Il primo obiettivo dell'analisi dei dati delle campagne è stato la determinazione del ritardo di marea tra la foce del Po di Goro (punto ESTERNO) e la bocca secondaria nello scanno (punto SCANNO).

L'interpretazione delle linee cotidali pubblicate con le tavole di marea e deducibili dallo sfasamento delle armoniche principali ai porti dell'Adriatico Settentrionale (Trieste, Venezia, Ravenna e Ancona), indica approssimativamente un ritardo di 20 minuti lungo l'intero scanno di Goro, cioè tra la foce del Po di Goro e la foce del Po di Volano.

L'analisi delle registrazioni di marea dell'aprile 1999 è stata quindi inizialmente compiuta sulle registrazioni simultanee dei punti ESTERNO e SCANNO. Per rendere meglio comprensibili le oscillazioni i dati grezzi sono stati filtrati con medie mobili a passo variabile (mezz'ora e un'ora) fino ad ottenere la migliore rappresentazione delle oscillazioni principali.

L'interpretazione visiva dei dati così filtrati ha portato a valutare un ritardo medio di circa mezz'ora tra il punto ESTERNO ed il punto SCANNO, come si può visibilmente dedurre dalla Figura 18, che mostra una delle onde principali misurate. Dall'analisi del grafico risulta evidente come il ritardo di marea non sia costante ma vari durante il ciclo registrato. L'onda di marea tipica misurata è una semidiurna di una certa ampiezza. La sfasatura è massima sulla cresta e cavo principali e si riduce fino quasi alla nullità sulla cresta secondaria.

Avendo riscontrato tale tipo di comportamento si è cercato di darne una ragione quantitativa analizzando le armoniche principali delle onde registrate. Essendo note le componenti principali delle onde di marea tipiche dell'Alto Adriatico. Invece di effettuare un'analisi di Fourier completa sulle oscillazioni registrate, si è optato per l'applicazione di un codice di calcolo che applica il metodo FOS (Fast Orthogonal Search) che è un adattamento dell' "Orthogonal Search Method" sviluppato da Korenberg (1988, 1989). Il codice si chiama FREQ ed è sviluppato dalla CoDebris di Solana Beach, CA, U.S.A.

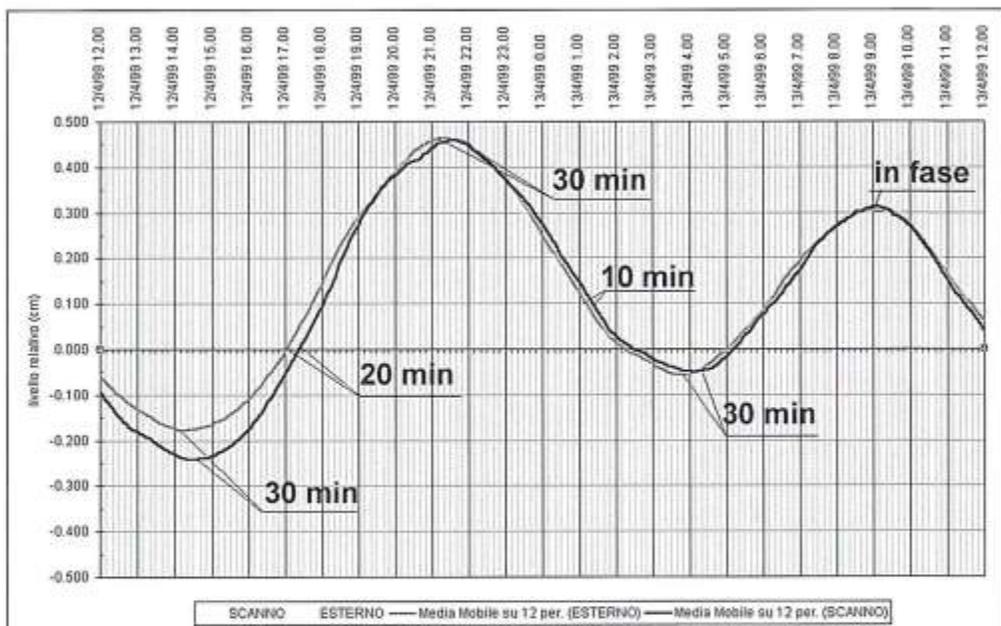


Figura 18 - Esempio di analisi visiva dei ritardi di marea tra ESTERNO e SCANNO.

Il metodo FOS verifica la qualità dell'adattamento di una serie di periodi di oscillazione "candidati" alla rappresentazione delle armoniche principali di un fenomeno oscillatorio. Per ogni periodo indicato come probabile armonica viene fornita l'entità dello sfasamento ed un valore di scarto quadratico medio che indica quanto quella particolare armonica, si adatta ai dati esaminati. Per la determinazione del ritardo di marea tra ESTERNO e SCANNO sono state confrontate le serie simultanee del periodo di registrazione 6-14 aprile 1999. L'asse del tempo è stato rappresentato in minuti a partire da uno zero comune alle due serie esaminate.

Su entrambi i campioni di misura sono state individuate le seguenti armoniche con lo stesso adattamento sulle due serie e con le fasi per ESTERNO e SCANNO riportate in tabella 5:

12.42 ore (componente M2 lunare principale semidiurna),

24.07 ore (componente P1 solare principale diurna),

12.00 ore (componente S2 solare principale semidiurna).

Lo sfasamento (in gradi ed in minuti, calcolato rispetto al periodo dell'armonica) risulta avere valore positivo in virtù della forma della trasformata di Fourier utilizzata nel codice FREQ per l'applica-

zione del metodo FOS. La funzione SENO delle equazioni ha segno positivo, mentre le armoniche indicate nelle tavole di marea pubblicate dal Servizio Mareografico risultano girare coerentemente con il verso antiorario della marea nell'Alto Adriatico.

**Tabella 5 - Calcolo dello sfasamento tra ESTERNO e SCANNO per le tre armoniche principali individuate.**

periodo minuti	ESTERNO		SCANNO		$\Delta$ fase °	$\Delta$ fase minuti
	Ampiezza m	fase °	Ampiezza m	fase °		
745.2	0.196	5.4	0.208	1.8	3.6	8
1444.2	0.105	326.9	0.123	316.2	10.7	42
720.0	0.112	191.1	0.112	188.7	2.4	5

I risultati ottenuti danno ragione del comportamento osservato nei dati di marea analizzati che hanno sfasature da 0 a 30 minuti, coerenti con i ritardi relativi alle armoniche individuate con il metodo FOS.

I risultati dell'analisi effettuata sono comunque da considerare con cautela in quanto i periodi di osservazione, lunghi circa una settimana, non sono sufficienti ad una definizione precisa delle componenti armoniche. L'analisi effettuata ha sicuramente individuato M2 come armonica principale, però non ha individuato la componente K1 (solilunare diurna) che è seconda per importanza (a Ravenna ha addirittura l'ampiezza maggiore). Per una corretta analisi sarebbero necessari dati simultanei per almeno un anno, periodo minimo necessario per una corretta definizione delle armoniche che costituiscono le oscillazioni di marea.

La variazione di sfasamento tra ESTERNO e SCANNO sembra comunque non avere una grossa influenza sull'andamento dei ritardi complessivi di marea tra ESTERNO e INTERNO nel caso in cui tutte le connessioni dell'area di fitodepurazione siano chiuse.

Anche se i dati di marea del punto INTERNO sono stati misurati con il mareografo a pressione, e quindi si risente maggiormente delle oscillazioni di livello di breve periodo, è stata comunque effettuata un'analisi del ritardo di marea tra SCANNO e INTERNO, filtrando opportunamente i dati con le medie mobili.

Il risultato dell'analisi nel periodo di funzionamento simultaneo dei due strumenti, dal 14 al 20 aprile 1999, mostra (pur in quadro di scarsa attendibilità del valore assoluto dei livelli misurati all'interno) un ritardo pressoché costante e pari a 30 minuti circa.

I dati delle maree misurati nella campagna di maggio 1999 (Fig. 16) risultano ancora di più difficile interpretazione, sia perché lo strumento posizionato allo scanno non ha potuto usufruire di un adeguato pozzetto di calma, sia perché tutte le aperture tra la sacca ed il Po all'altezza dell'area di fitodepurazione possono aver condizionato non poco i dati misurati.

Come riportato nella Figura 19, si nota un ritardo della marea interna di circa 1 ora rispetto alla marea esterna ed una significativa differenza di livello dovuta, questa volta, esclusivamente allo sfasamento.

#### **Analisi dei dati correntometrici**

Nel corso della campagna mareografica del mese di maggio 1999 sono state anche effettuate misure di velocità nei canali principali. Lo strumento utilizzato oltre a fornire il profilo verticale di velocità in modulo e direzione ha registrato, a mezzo di una sonda multiparametrica, anche i seguenti valori di qualità chimico-fisica dell'acqua: temperatura, conducibilità, salinità, torbidità.

Vengono presentati in Figura 20 i profili di velocità ottenuti sulle stazioni A, B, C, D ed E.

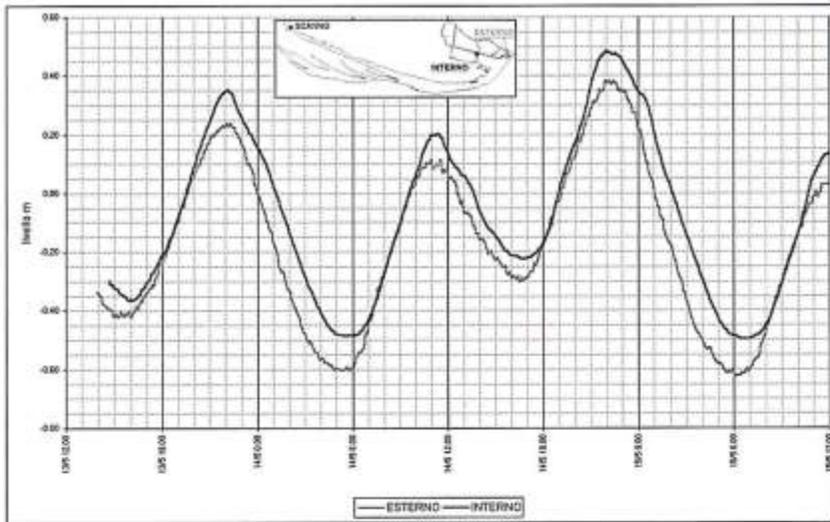


Figura 19 - Confronto tra i livelli misurati nei punti INTERNO ed ESTERNO nella campagna di maggio 1999.

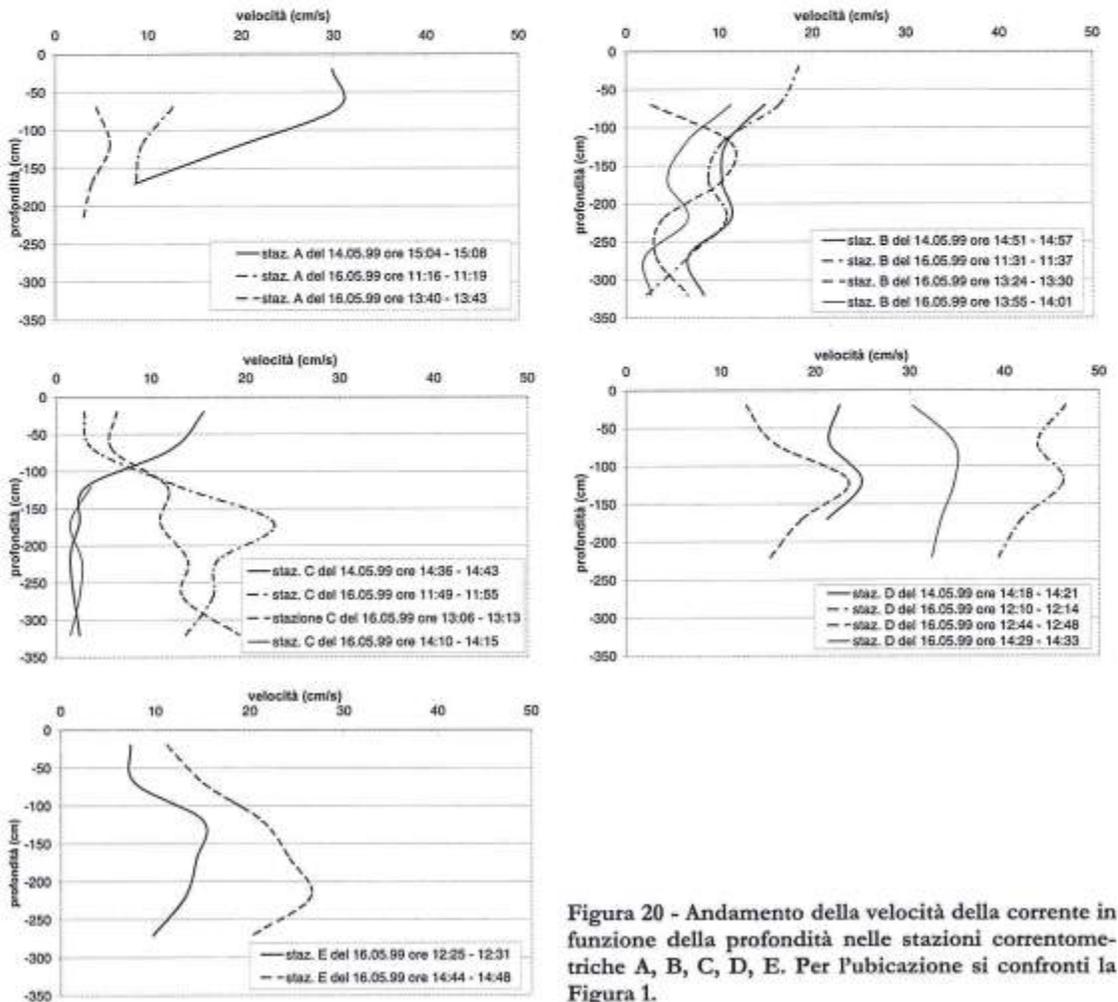


Figura 20 - Andamento della velocità della corrente in funzione della profondità nelle stazioni correntometriche A, B, C, D, E. Per pubblicazione si confronti la Figura 1.

I cinque punti analizzati hanno tra di loro caratteristiche totalmente diverse ed individuano tre ambienti differenti:

- a) i punti delle stazioni di misura D ed E, posizionati vicino alla bocca secondaria dello scanno, sono caratterizzati da acque completamente marine; i flussi in ingresso ed uscita dalla sacca avvengono senza inversioni del profilo di velocità lungo i rami del canale;
- b) il punto misurato nel canale dell'area di fitodepurazione (punto A) è caratterizzato, in fase di crescita dell'onda di marea, totalmente da acqua dolce, di provenienza fluviale, mentre in fase di marea calante le acque presentano una maggiore salinità ma seguono pressappoco lo stesso verso di moto (subparallelo alla direzione del Po, da monte verso valle);
- c) i punti B e C, rilevati lungo il canale principale, presentano entrambi condizioni di effettiva stratificazione del flusso, con un evidente pacchetto di acqua dolce superficiale, che si muove in direzione spesso opposta a quella del pacchetto d'acqua salata sottostante.

La profondità del canale, nei punti B e C, fa sì che sugli strati più profondi si abbia una ulteriore inversione del flusso, non più dovuta alla salinità, ma probabilmente effetto della diversa temperatura tra gli strati.

### Conclusioni

Il regime anemologico caratteristico del lobo meridionale del delta del Po, così come evidenziato dai dati raccolti, mostra spiccato carattere stagionale, con venti maggiormente distribuiti e privi di picchi di velocità predominanti (fatta eccezione per il settore di sud-est) nel periodo estivo e tipicamente concentrati in un settore di provenienza delimitato dalla Bora (nord-est) e dallo Scirocco (sud-est) nel periodo invernale.

L'analisi dei dati di moto ondoso disponibili per la Sacca di Goro ha identificato che la maggior parte dell'energia è distribuita nel settore di traversia compreso tra Nord-Est e Sud-Est, con altezze d'onda significativa comprese tra 0.5 ed 1 metro. I massimi eventi con altezza d'onda di 4.5 metri provengono dalla direzione 90°N.

La parte interna del canale navigabile di Goro è caratterizzata da un regime di marea senza particolare asimmetria con correnti massime in eccesso superiori ai 40 cm/s in sizige, sia in fase di flusso che di riflusso. La parte esterna alla bocca principale risulta dominata dalla corrente di riflusso con velocità, in sizige, superiori ai 45 cm/s. Tale zona risulta, inoltre, controllata dall'azione del moto ondoso data la sua esposizione. Lungo la zona interna dello Scanno il ritardo di marea tra la bocca secondaria e l'estremità orientale della laguna è dell'ordine di 30 minuti, mentre tra la zona orientale interna della laguna e la foce del Po di Goro si osserva un ritardo di circa 1 ora. La zona interna prossima alla bocca secondaria ha una massa d'acqua di caratteristiche tipicamente marine; l'estremità orientale della Sacca in fase di marea crescente è dominata da acqua dolce, mentre in fase di marea calante denota un aumento di salinità. La zona intermedia presenta stratificazione delle due masse d'acqua con versi di scorrimento opposti tra l'acqua salata, vicino al fondo, e l'acqua dolce superficiale.

### Rinraziamenti

Si ringraziano A. Bertoni ed i responsabili delle Cooperative di Pesca di Goro e Gorino per il supporto tecnico fornito durante le campagne di misura, nonché la Centrale ENEL di Porto Tolle per aver gentilmente messo a disposizione i dati anemologici della centralina meteo di Lido di Volano. I dati di moto ondoso sono stati forniti dall'AGIP tramite l'Università di Bologna, Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico Ambientali, sede distaccata di Ravenna. Si ringraziano il Dott. G. Fontolan ed il Prof. G. Gabbianelli per avere reso disponibile la strumentazione usata per le misure. Lo studio è stato condotto con finanziamenti della Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura (responsabile U. Simeoni), ex 60% (responsabile U. Simeoni) e del fondo COFIN 98 (responsabile R. Dal Cin) del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (M.U.R.S.T.).

### **Bibliografia**

- Calderoni, G. (1982) - *Regime anemologico nel Delta del Po e alla foce dell'Adige*. Annali dell'Università di Ferrara, sez. IX - Scienze Geologiche e Paleontologiche, vol. VIII, n. 4: 61-69.
- Idroser (1994) - *Aggiornamento ed integrazione del Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola. Relazione generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp 276.
- Idroser (1996) - *Progetto di Piano per la Difesa del Mare e la Riqualificazione Ambientale del Litorale della Regione Emilia-Romagna. Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp 365.
- Korenberg, M. J. (1988) - *Identifying nonlinear difference equation and functional expansion representations: The fast orthogonal algorithm*. Ann. Biomed. Eng. 16:123-142.
- Korenberg, M. J. (1989) - *A robust orthogonal algorithm for system identification and time-series analysis*. Biol. Cybernetics, 60:267-276.

**Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 30/3/2000.**

## Caratterizzazione della morfologia di spiaggia lungo lo Scanno di Goro tramite tecniche GPS e rilievi batimetrici

Paolo Ciavola<sup>1</sup>, Marco Gatti<sup>2</sup>, Umberto Tessari<sup>1</sup>,  
Andrea Zamariolo<sup>1</sup> e Carlo Del Grande<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara,  
C.so Ercole I d'Este 32 - 44100 Ferrara

<sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara,  
Via Saragat 1 - 44100 Ferrara

<sup>3</sup>Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico Ambientali, Università di Bologna,  
Via Zamboni 67 - 40127 Bologna

### Riassunto

Allo scopo di evidenziare le caratteristiche morfologiche e dinamiche della spiaggia dello Scanno di Goro è stato svolto un rilievo topografico della linea di riva ed un rilievo topobatimetrico lungo una serie di sezioni, orientate ortogonalmente alla costa. Il posizionamento è stato effettuato mediante ausilio della tecnica GPS cinematica, dimostratasi accurata e rapida. Ciò ha consentito l'identificazione di zone soggette a variazioni morfologiche e l'individuazione di tre principali tipologie di profilo di spiaggia con comportamento morfodinamico da riflettente a dissipativo. In prossimità della foce del Po di Goro le spiagge sono caratterizzate da barra parallela; nella parte intermedia dello Scanno forme come il terrazzo di bassa marea diventano predominanti; sulla parte terminale dello Scanno si osservano forme in emersione sulla battigia, legate al meccanismo evolutivo del sistema.

### Introduzione

La freccia litorale che separa la Laguna di Goro dal mare aperto, viene indicata con una terminologia di uso locale molto particolare, "Scanno di Goro", sia nella letteratura geografico-geologica che in quella divulgativa. Nel seguente articolo l'uso del termine Scanno è essenzialmente riferito a questa forma costiera, per quanto in geomorfologia la parola è generalmente considerata come traduzione dell'inglese *nearshore bar*, la barra di spiaggia situata al di sotto del livello delle basse maree (Carobene e Brambati, 1975). Lo Scanno ha iniziato a formarsi tra la fine del 1800 e l'inizio del secolo scorso, inizialmente come un sistema di frecce-isole barriera, che si allungavano per circa 3.5 km dalla foce del Po di Goro e che presentavano una serie di isolette sabbiose alla loro estremità (Dal Cin, 1994). L'attuale freccia litorale ha cominciato a prendere forma dal 1940 in poi, mentre il precedente sistema veniva eroso e sommerso, presentando fasi alterne di accrescimento ed erosione sino a circa il 1977. Da allora sino ai tardi anni '80 lo Scanno soffre una forte erosione in seguito alla diminuzione del carico sedimentario del Po, perdendo circa un chilometro di lunghezza rispetto ai complessivi 7.8 km del 1977 (Dal Cin, 1994). Dalla fine degli anni '80 in poi, la freccia ricomincia a crescere ed a cambiare forma, occludendo gran parte della laguna retrostante, tanto che negli anni '90 interventi di apertura di bocche artificiali vengono effettuati per migliorare lo scambio idrico con il mare aperto, producendo forti disequilibri nella dinamica evolutiva della freccia litorale (Simeoni et al. 1998a; 1998b).

### Scopo del lavoro

Dati sull'andamento della linea di riva utilizzando metodi aereofotogrammetrici tradizionali vengono raccolti in maniera sistematica da organizzazioni governative in vari paesi del mondo, ad es. le agenzie federali negli Stati Uniti (Gorman et al., 1998) o il Ministero dei Lavori Pubblici nei Paesi Bassi (Rijkswaterstaat, 1990). In Italia alcune autorità regionali utilizzano tale metodo per studi di gestione costiera (Idroser, 1996). Come puntualizzato da Gorman et al. (1998), tale metodo permette di coprire aree molto vaste in poco tempo, tranne che condizioni di scarsa visibilità dovute a presenza di nebbia o nubi rappresentino un problema. Inoltre, il rilievo fotogrammetrico deve essere affiancato da rilevamenti batimetrici sulla parte sommersa della spiaggia, per quanto il recente sviluppo della costosa tecnica LIDAR (LI Detection And Ranging) permetta di effettuare anche il rilievo batimetrico tramite sensore in volo, con precisione verticale nell'ordine dei 15 cm (Irish e Lillycrop, 1999). Sono stati eseguiti profili topobatimetrici e rilievi della linea di costa con tecnica GPS allo scopo di evidenziare le caratteristiche morfologiche della spiaggia emersa e sommersa lungo lo Scanno di Goro e di ottenere una linea di riva aggiornata. Nel lavoro verrà evidenziata la metodologia di misura applicata e verranno messi in evidenza i vantaggi di tale tecnica. In Figura 1 è riportata l'ubicazione dei profili eseguiti lungo lo Scanno ed i vertici della rete GPS di inquadramento utilizzata durante l'indagine.

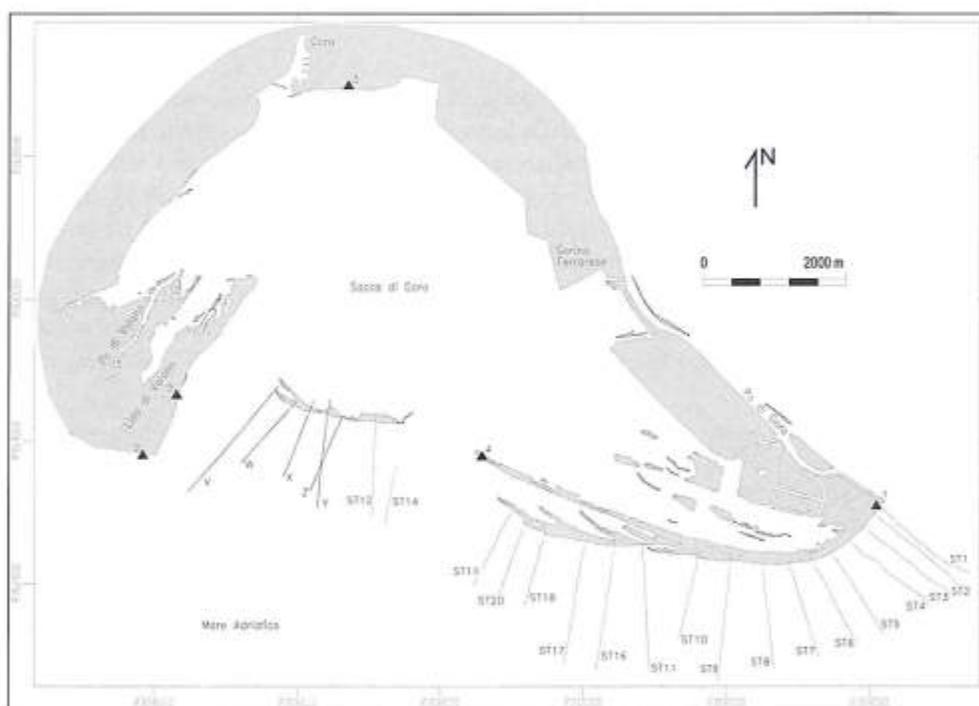


Figura 1 - Carta con profili e vertici GPS della rete di inquadramento (coordinate Gauss Boaga – fuso est).

### Metodologia di rilievo della linea di riva

#### Definizione di “Linea di Riva”

Oggetto del rilevamento è la “Linea di Riva”, intesa come linea di contatto tra il mare e la terraferma (*shoreline*), ovvero quella linea che si ottiene dall'intersezione delle superfici che rappresentano il livello medio del mare ed il terreno (Fig. 2). La linea di riva così definita è, per sua natura, di difficile localizzazione sul terreno: l'effetto delle maree e la presenza di eventi meteomarinari locali particolarmente sfavorevoli, possono produrre su di essa forti variazioni geometriche in limitati intervalli di tempo. Per questo motivo tale linea, verrà da noi indicata con il nome di “Linea di Riva Vera o Teorica”.

Sul terreno può essere localizzata anche una linea di riva convenzionale, indicata con il nome di "Linea di Riva Istantanea". Essa rappresenta la linea di intersezione del terreno con la superficie del mare al momento (istante) della misura (Fig. 2).

La "Linea di Riva Teorica" e quella istantanea si trovano all'interno di una striscia di terra di ampiezza variabile, delimitata dal livello di alta e di bassa marea. Tale striscia di terra si indica con il nome di "Fascia Intertidale" (Fig. 2).

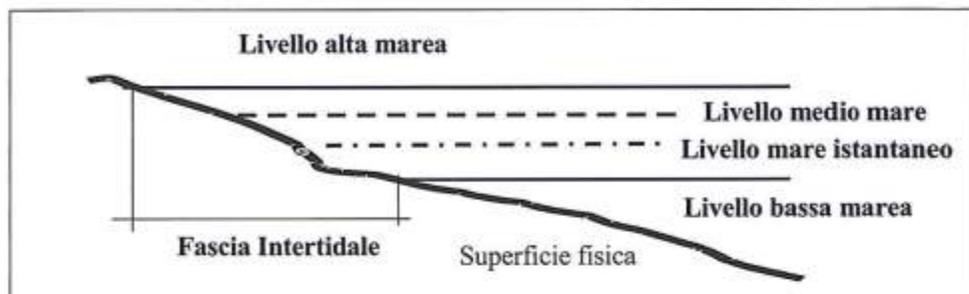


Figura 2 - Definizioni di linea di riva.

### **Tecnica di Misura**

La posizione planimetrica della linea di "Riva Teorica" può essere determinata, con attendibilità, attraverso un rilevamento diretto, eseguito con tecniche e strumentazioni topografiche classiche. Tale metodo può dare risultati di notevole precisione, ma si presenta lento e costoso, soprattutto quando i tratti di costa da rilevare sono di notevole lunghezza (Gorman et al., 1998).

Nello studio qui presentato si è rinunciato a questo tipo di rilevamento, optando per un rilevamento GPS in modalità "Cinematica", nelle due varianti "Continua" e "Stop and Go". Tale tecnica comincia a trovare applicazione sempre maggiore nel campo del rilevamento di spiaggia, in virtù della grande precisione e rapidità di misura (Dail et al., 2000).

### **Tecnica GPS cinematica "continua"**

In tale tecnica si posiziona, per tutta la durata del rilievo, un ricevitore GPS (ricevitore Master) su di un vertice di coordinate note (Fig. 3): con un secondo ricevitore GPS (ricevitore Rover) si percorre la spiaggia, seguendo il limite di battigia (Fig. 3). Attraverso la misura della fase del segnale trasmesso dal satellite, è possibile, per ogni intervallo di campionamento, calcolare le coordinate tridimensionali del ricevitore in movimento, ovvero le coordinate dei punti di battigia. Il rilievo deve essere fatto in periodi di mare calmo, quando cioè le condizioni meteorologiche non influenzano troppo il livello del mare ed è presente il solo effetto della "marea astronomica". In generale è questa la situazione operativa migliore nella quale si elimina, in un determinato paraggio la cosiddetta "marea meteorologica". Quest'ultima è prodotta da forti venti o brusche differenze di pressione atmosferica ed è responsabile delle variazioni anomale di livello marino in bracci di mare chiusi o poco profondi.

E' consigliabile, inoltre, rilevare più volte il tratto di costa, per esempio una volta in andata ed una volta in ritorno. La tecnica presenta una grande produttività: un rilevatore che si muove sulla spiaggia a passo d'uomo può misurare anche dieci chilometri di costa al giorno. Da sottolineare anche la sua precisione: le coordinate tridimensionali del limite di battigia sono caratterizzate da errori quadratici medi non superiori ai dieci centimetri (Gatti et al., 1995). Con questa tecnica si rileva la posizione della "Linea di Riva Istantanea", ovvero la posizione della linea di riva all'istante della misura.

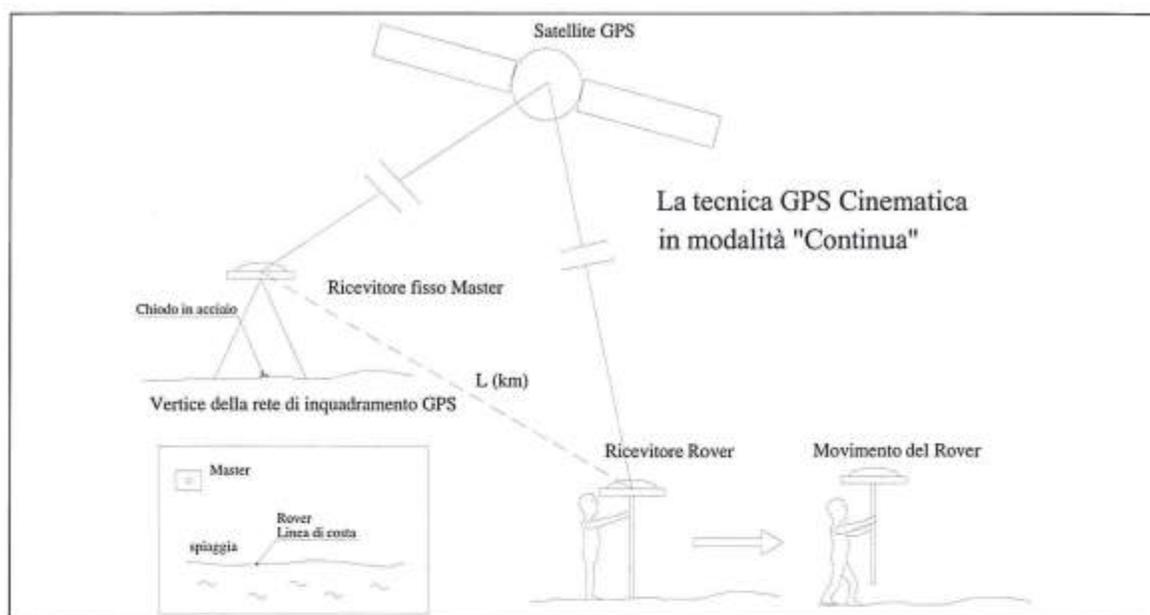


Figura 3 - La tecnica GPS Cinematica "Continua": schema della misura.

#### Tecnica GPS cinematica "Stop and Go"

Il rilievo della linea di costa può essere eseguito rilevando in modalità cinematica "Stop and Go" delle sezioni trasversali alla linea di riva (Fig. 4). A rilievo eseguito si individua, su ciascuna di esse, il punto di quota zero, con riferimento al livello medio del mare locale. Congiungendo i punti di quota zero appartenenti ad ognuna delle sezioni rilevate, si ottiene una spezzata che rappresenta l'andamento planimetrico della linea di costa. La tecnica è molto simile a quella topografica tradizionale, ma presenta tutti i vantaggi derivanti dall'uso della metodologia e della strumentazione GPS.

Le fasi del rilevamento di una generica sezione sono le seguenti:

- Registrazione, per tutto il tempo del rilievo, della misura di fase del satellite, da parte di un ricevitore GPS (ricevitore Master) posto su di un vertice di coordinate cartografiche E, N e di quota ortometrica H note (Fig. 4);
- Registrazione, per qualche istante, della misura di fase del satellite, da parte di un secondo ricevitore GPS (ricevitore Rover) posto sui punti caratteristici di una sezione e calcolo delle loro coordinate E, N, H rispetto al ricevitore Master (Fig. 4).

A sezione misurata si individuano su di essa le posizioni in quota delle linee di alta e di bassa marea. Tali posizioni si deducono calcolando le escursioni di marea fornite dalle tavole previsionali di marea del giorno e dell'ora in cui si esegue la misura. Sulla stessa tavola di marea si può anche calcolare l'escursione tra la posizione del livello medio del mare del giorno di misura e la posizione del livello del mare istantaneo. Tale escursione consente di individuare sul profilo il punto di quota 0.00 e la retta che rappresenta la linea di costa vera o teorica del giorno della misura.

Si riportano in planimetria i punti di quota 0.00 di ognuna delle sezioni rilevate e si congiungono, ottenendo una spezzata che rappresenta la posizione planimetrica della linea di costa vera o teorica. Lungo il profilo è consigliabile rilevare, oltre al livello mare istantaneo, anche la posizione di eventuali caratteri morfologici presenti (limite di alta marea, berme, variazioni di pendenza, barre) spingendo l'indagine anche ad una porzione significativa della spiaggia sommersa.

Tale tecnica è più lenta e laboriosa di quella continua, in quanto necessita della sosta dell'operatore sui punti della sezione per circa 3 minuti. Tuttavia, risulta essere, più precisa: le coordinate dei pun-

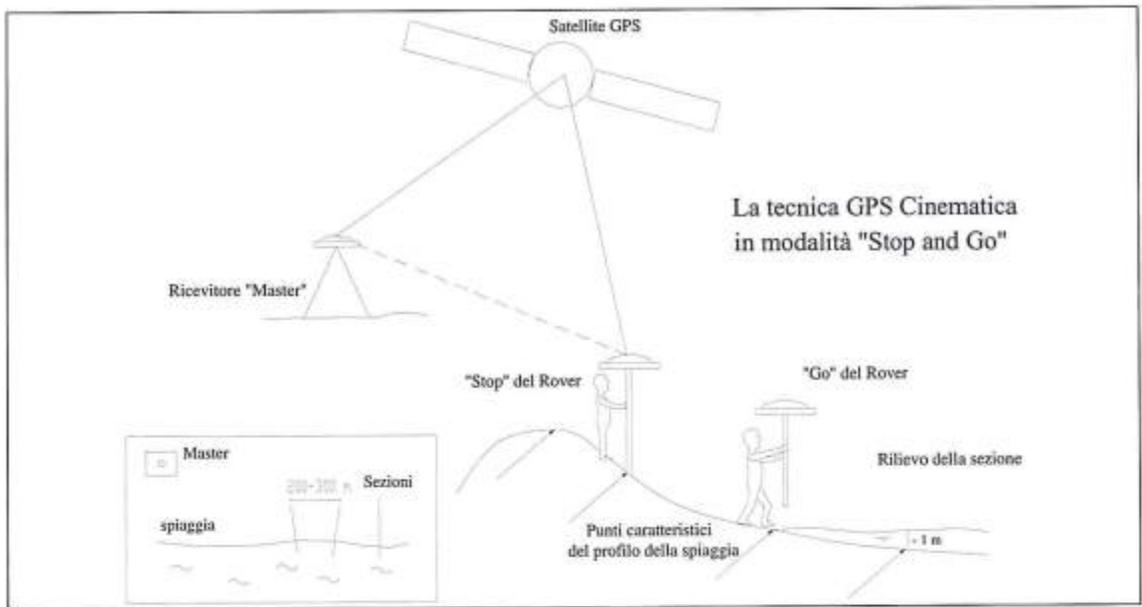


Figura 4 - La tecnica GPS Cinematica "Stop and Go": schema della misura.

ti del profilo hanno errori quadratici medi inferiori ai cinque centimetri. Inoltre con essa si rileva la posizione della linea di riva vera o teorica.

#### *Rete di Inquadramento, Geoide Locale e Tavole di Marea*

L'utilizzo della tecnica GPS in modalità cinematica ha richiesto l'istituzione ed il rilevamento di una rete di inquadramento, la conoscenza delle ondulazione ellissoidiche e delle previsioni della marea.

La rete di inquadramento istituita nella Sacca di Goro, è costituita da tre vertici principali e due vertici secondari (Fig. 1).

Nelle operazioni di calcolo si è eseguita una compensazione a minimi vincoli, assumendo come fisse le coordinate del vertice 1: queste ultime furono dedotte precedentemente per collegamento alla rete internazionale IGS (Gatti, 1996). La rete è stata poi rototraslata nel sistema cartografico nazionale di Gauss-Boaga, utilizzando i parametri di rototraslazione forniti dall'Istituto Geografico Militare Italiano. Ognuno dei vertici fu infine collegato altimetricamente ai caposaldi della rete di livellazione dell'Idroser (1996). Durante la campagna di misura "cinematica", su tali vertici sono stati posizionati i ricevitori GPS "Master".

Per trasformare la differenza di quota ellissoidica, misurabile con il GPS, in differenza di quota ortometrica, necessaria per l'inquadramento altimetrico delle sezioni trasversali, si è reso necessario stimare un modello di geoide "locale". Data la limitata estensione della zona, è stato ipotizzato un modello di geoide "piano". I valori dei residui della compensazione sono risultati di pochi centimetri, confermando la validità dell'ipotesi assunta.

Come è ben noto, il livello medio mare in un punto si ottiene mediando le osservazioni ottenute con un mareografo, in un lungo periodo di tempo. Poiché nella zona di rilievo non era in funzione nessun mareografo, per valutare l'escursione giornaliera del livello del mare e le relative alte e basse maree nelle giornate di misura, si è deciso di usare i dati di marea previsionale forniti da un programma di calcolo (Hydrographic Office, 1991). Il programma esegue il calcolo delle previsioni di marea astronomica, applicando gli algoritmi dell'analisi armonica; tali previsioni sono state confrontate con quelle misurate al mareografo di Porto Corsini (Ravenna) nei giorni del rilevamento, che dista una cinquantina di chilometri dalla zona di sperimentazione. Le previsioni confrontate risulta-

no molto simili, permettendo quindi di escludere l'influenza di agenti locali come il vento od il moto ondoso nel causare condizioni anomale di "acqua alta" (*storm surge*).

### Risultati della campagna di misure della linea di riva

La campagna di misure, svoltasi tra la primavera e l'estate del 1998, ha interessato il tratto di spiaggia antistante il Lido di Volano e lo Scanno di Goro. I tratti di costa sono stati rilevati con la tecnica GPS in modalità cinematica "Continua", sia in andata che in ritorno, per un totale di circa 30 km di costa "istantanea". L'intervallo di campionamento è stato settato ad 1 secondo con rilievo di un punto ogni tre metri di costa circa. Il rilievo di tutti i tratti di costa è stato integrato da sezioni trasversali, ad interasse di circa 500 metri, rilevate con la tecnica GPS "Stop and Go". In ogni sezione sono stati misurate le posizioni di 8-10 punti; di questi alcuni si trovavano sulla spiaggia emersa, uno sulla battigia (livello del mare istantaneo) ed altri in acqua (profondità di 0,5 ed 1 m). Il tempo di stazionamento (tempo di stop) per ogni punto di sezione è stato di 50-60 secondi. In Figura 5 è evidenziato un esempio del confronto tra la tecnica GPS cinematica "continua" e "Stop and Go".

Le coordinate geografiche dei punti rilevati sono state trasformate dal sistema di riferimento WGS84 al sistema cartografico nazionale. In seguito tali coordinate sono state riportate sui fogli della Carta Tecnica Regionale (C.T.R.) alla scala nominale 1:5000, ottenendo la rappresentazione cartografica della linea di costa misurata.

La planimetria rilevata sullo Scanno è stata anche sovrapposta alle carte ricavate da alcuni voli fotogrammetrici eseguiti sulla Sacca in tempi recenti: in particolare si è sovrapposto la planimetria alle linee di riva derivate dai voli effettuati negli anni 1978, 1983, 1991 e 1994. Queste ultime sono state ricavate dai dati della Idroser (1996). Dalla sovrapposizione si nota una forte evoluzione dello Scanno con alcune zone di accrescimento e altre di erosione in direzione Nord - Sud e anche la presenza di numerose frecce litorali di minore entità rispetto allo Scanno che emergono e scompaiono in funzione del livello del mare.

Nella parte più a Est si notano arretramenti anche di 150 - 200 metri rispetto al 1983 e 1991 e avanzamenti di circa 100 metri rispetto al 1978.

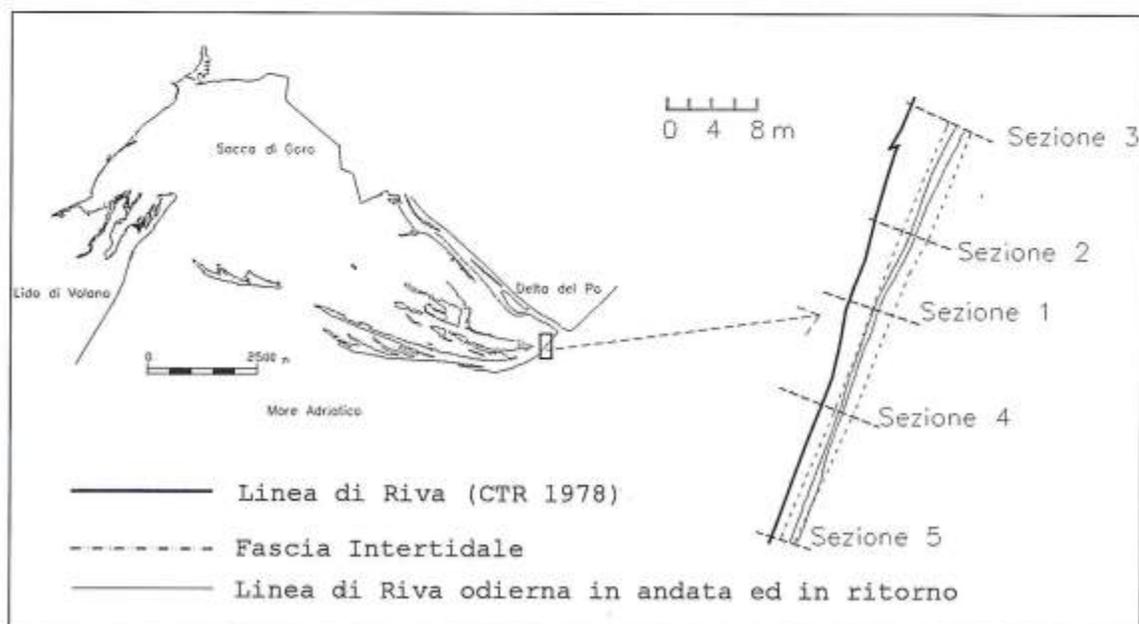


Figura 5- Confronto tra la tecnica GPS cinematica "continua" e "Stop and Go".

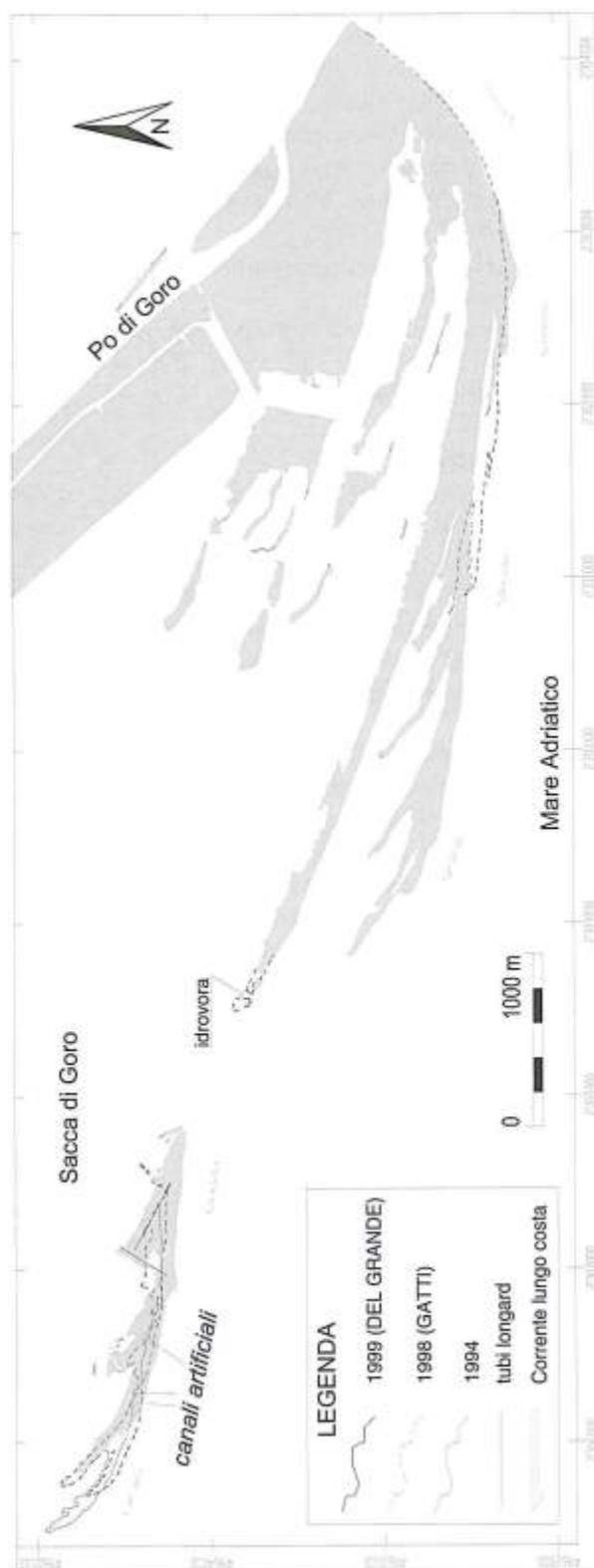


Figura 6 - Rilievo aggiornato al 1999 dello Scanno di Goro ottenuto con tecnica GPS cinematica

Spostandosi verso Ovest la linea di costa rilevata con il GPS è di poco differente dagli anni precedenti, e muovendosi ancora più a Ovest, la presenza di frecce litorali di minori dimensioni rende difficile un vero e proprio confronto fra i diversi anni.

Nelle immediate adiacenze dell'impianto idrovoro posto sullo Scanno il rilievo in cinematico è stato attuato seguendo sia il perimetro individuato dai manufatti dell'idrovora sia il contorno delle lingue di sabbia; per queste ultime il rilievo è stato eseguito seguendo il livello istantaneo del mare.

Dalla planimetria risultante si può ben notare come la morfologia sia completamente cambiata, tanto che l'attuale isola non era presente nel 1978; rispetto al 1991 la stessa planimetria ha una forma molto più allungata in direzione Est – Ovest.

La bocca lagunare che si è creata fra i due scanni ha completamente fatto scomparire alcune lingue di sabbia presenti fino a circa il 1991.

Per quanto riguarda l'isola occidentale dello Scanno, la linea di costa rilevata con il GPS è profondamente variata rispetto a quella riportata sulla C.T.R. (Fig. 6, pag. prec.), a testimonianza di come gli interventi eseguiti dopo il 1978 abbiano modificato la morfologia dello Scanno.

### Rilievo di profili topobatimetrici

Allo scopo di evidenziare la morfologia di spiaggia nel Maggio 1998 sono stati eseguiti lungo lo Scanno di Goro e sull'isola occidentale 23 profili topobatimetrici estesi dalla batimetrica -6 m alla cresta della duna (ove presente) o al limite della spiaggia emersa (vedi Fig. 1 per localizzazione). Il rilievo batimetrico vero e proprio è stato effettuato utilizzando un Ecoscandaglio FURUNO a registrazione cartacea, mentre il posizionamento planimetrico dei *fix* batimetrici e planoaltimetrico della spiaggia emersa è stato effettuato mediante utilizzo di una stazione totale Zeiss Elta 3 o, in alternativa, mediante il GPS cinematico. In Figura 7 vengono riportati alcuni profili significativi.

### Campionamento sedimentologico

Per ogni profilo topobatimetrico sono stati raccolti campioni in corrispondenza dei principali elementi morfologici (duna, berma, battigia, gradino di battigia, *swash bar*, truogolo, cresta barra, base barra) e successivamente ogni metro di profondità sino a 6 metri, utilizzando una piccola benna. In laboratorio i campioni sono stati analizzati usando la bilancia di sedimentazione per la frazione sabbiose ed il sedigrafo Sedigraph 5000D per la frazione fangosa, ove presente. I sedimenti sono stati caratterizzati usando i parametri grafici (Folk, 1974) e la classificazione di Wentworth. Una volta ottenuto il Diametro Medio ( $M_z$ ) del campione è stata calcolata una velocità di sedimentazione "media", utilizzando la formulazione di Hallermeir (1981) per sabbie fini e molto fini, dato che i campioni ricadevano tutti in tali categorie. In Figura 8 vengono presentati gli andamenti del Diametro Medio e Deviazione Standard grafici (in unità phi) sulla stessa scala orizzontale dei profili (Fig. 7).

### Indici morfodinamici

Nonostante sia necessaria la ripetizione dei profili per un periodo significativo di almeno 12 mesi allo scopo di caratterizzare lo stato morfodinamico di una spiaggia e di valutarne l'importanza delle variazioni stagionali, si è deciso di procedere a caratterizzare le spiagge dello Scanno di Goro da un punto di vista morfodinamico, usando le più recenti classificazioni presenti nella letteratura internazionale (Wright e Short, 1984; Masselink e Short, 1983; Masselink e Hegge, 1985). Si sono inoltre confrontati alcuni dei profili effettuati con i rilevamenti svolti dalla Idroser (1996) nel periodo dal novembre 1993 al febbraio 1994. Va fatto notare il fatto che tali rilevamenti siano stati effettuati in inverno, mentre quelli oggetto di questo articolo sono stati svolti nella tarda primavera. Ciò comporta alcune limitazioni interpretative nel confronto tra i rilievi, per quanto il clima meteomarinico della zona indichi che a livello energetico il passaggio a condizioni estive avviene in genere da giugno in poi. Inoltre i capisaldi usati dalla Idroser non sono stati ritrovati sul campo, per cui il posizionamento dei profili è basato sulle carte contenute nella relazione del 1996.

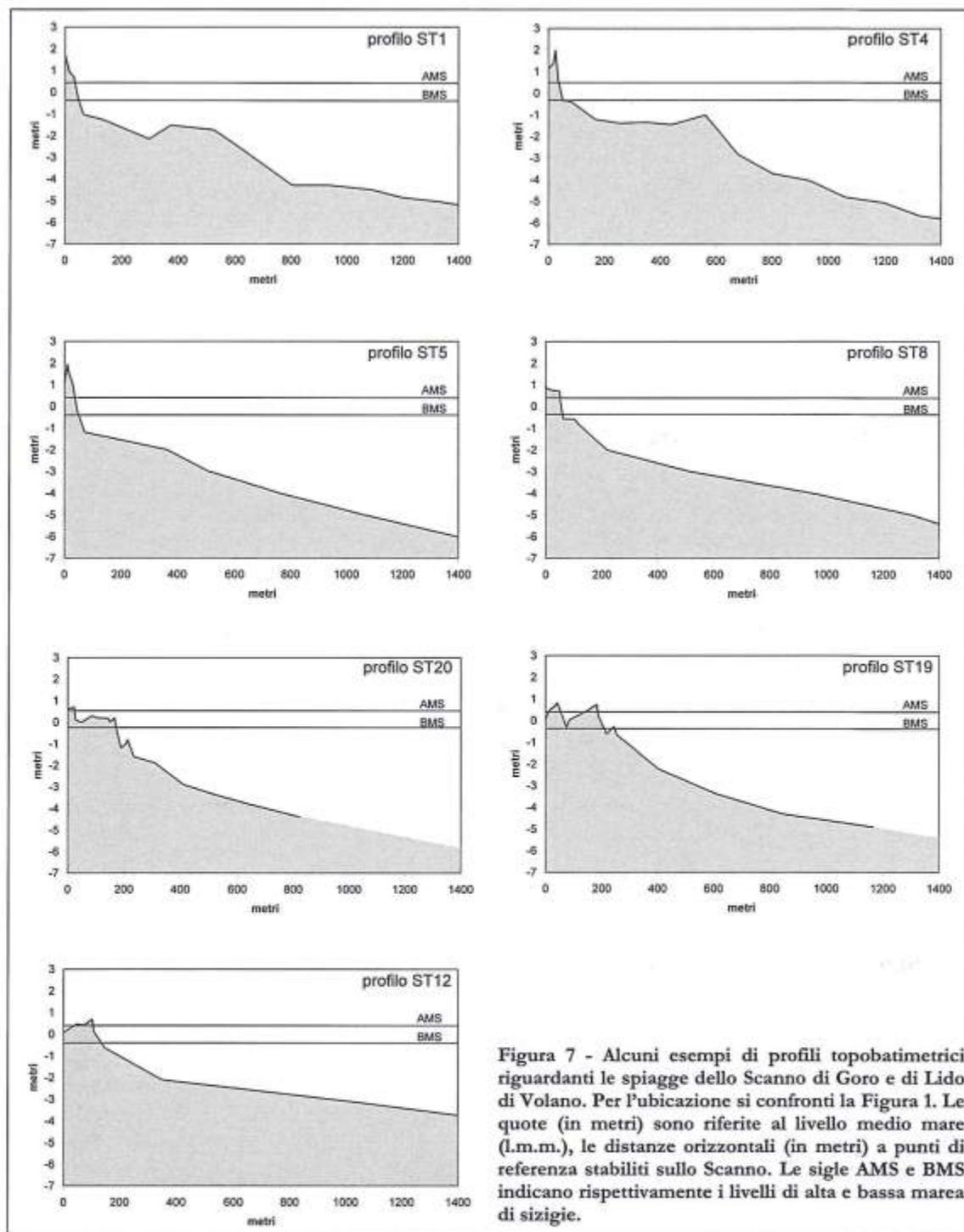


Figura 7 - Alcuni esempi di profili topografici riguardanti le spiagge dello Scanno di Goro e di Lido di Volano. Per l'ubicazione si confronti la Figura 1. Le quote (in metri) sono riferite al livello medio mare (l.m.m.), le distanze orizzontali (in metri) a punti di riferimento stabiliti sullo Scanno. Le sigle AMS e BMS indicano rispettivamente i livelli di alta e bassa marea di sizigie.

Per poter calcolare gli indici morfodinamici è necessario ottenere per ogni profilo considerato dei valori rappresentativi della pendenza ( $\tan\beta$ ) e della dimensione media. Seguendo le raccomandazioni del CERC (Gorman et al., 1998), si sono calcolati tali parametri per la battigia (*beach slope*), avente come limiti il piede della duna ed il livello medio mare.

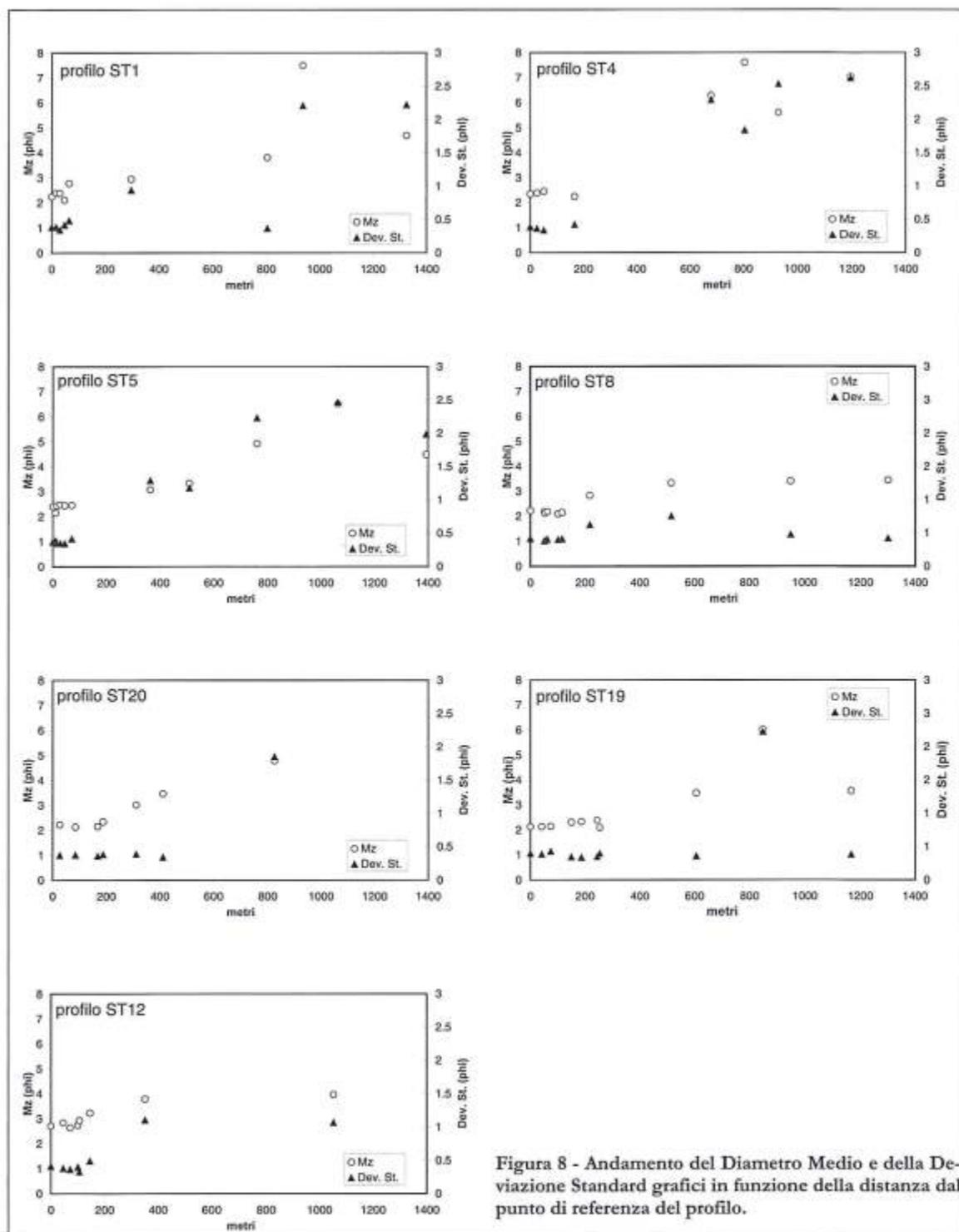


Figura 8 - Andamento del Diametro Medio e della Deviazione Standard grafici in funzione della distanza dal punto di riferimento del profilo.

In maniera analoga si è proceduto per la spiaggia sommersa (*nearsbore slope*), delimitata dal livello medio mare e dalla rottura di pendenza esterna alla barra. Per ognuno di questi due segmenti si sono quindi calcolati un diametro medio rappresentativo ottenuto tramite media aritmetica dei valori di media grafica ed una conseguente velocità di sedimentazione.

E' stata, inoltre, calcolata la componente energetica legata al moto ondoso, sotto forma di altezza modale alla frangenza e periodo. A tale scopo, dato che caratterizzazioni del moto ondoso in prossimità della Sacca (Idroser, 1996; Med Ingegneria, 1998) indicano che l'onda significativa (alla piattaforma PCB) più frequente nel paraggio ha provenienza tra i 90 ed 135 °N, con altezza di 0.5 m e periodo sui 3 sec, si è, quindi, deciso di considerare come valore modale di moto ondoso in condizioni di mare profondo una direzione di 120 °N con i valori di altezza d'onda e periodo indicati sopra. Tale onda è stata trasportata alla frangenza per ognuno dei profili batimetrici individuati in Figura 7 tramite codice di calcolo scritto dall'autore principale (Ciavola, 1991; 1997), utilizzando la teoria d'onda lineare per il calcolo delle trasformazioni dovute ai fenomeni di rifrazione e shoaling su fondo, imponendo come condizione di frangenza un rapporto altezza/profondità di 0.78. Per poter utilizzare la classificazione morfodinamica di Wright e Short (1984) sono stati calcolati i seguenti indici:

a) Parametro di scala del *surf* di Guza e Inman (1975):

$$\epsilon = (a\omega^2)/g \tan^2\beta \quad [1]$$

dove  $\tan\beta$  è la pendenza della battigia,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $a$  è l'ampiezza dell'onda ( $H/2$ ) e  $\omega$  ( $2/\pi T$ ) è la frequenza angolare dell'onda.

b) Velocità di sedimentazione adimensionale di Dean (1973):

$$\Omega = (H_b)/w_s T \quad [2]$$

dove  $H_b$  è l'altezza d'onda alla frangenza,  $w_s$  è la velocità di sedimentazione del diametro medio del sedimento di spiaggia e  $T$  il periodo d'onda.

Tabella 1 - Parametri utilizzati nel calcolo degli indici morfodinamici. La sigla BS indica la battigia, quella NS la spiaggia sommersa. Gli asterischi indicano l'appartenenza del campione al silt, da cui l'inapplicabilità dell'equazione di Hallermeier (1981).

Sigla Profilo	$M_z$ (phi)	$\tan\beta$	$H_b$ (cm)	$T_s$ (sec)	$W_s$ (cm/sec)	( $\epsilon$ )	( $\Omega$ )	RTR
ST1BS	2.30	0.041	50	3	3.71	66.4	4.5	1.60
ST1NS	4.25	0.006	42	3	*	2605.7	*	1.90
ST4BS	2.46	0.045	45	3	2.97	49.6	5.0	1.78
ST4NS	5.38	0.005	45	3	*	4020.2	*	1.78
ST5BS	2.45	0.073	44	3	3.01	18.4	4.9	1.82
ST5NS	2.95	0.006	44	3	1.51	2729.8	9.7	1.82
ST8BS	2.18	0.018	39	3	4.38	268.8	3.0	2.05
ST8NS	2.32	0.012	39	3	3.61	604.9	3.6	2.05
ST12BS	2.74	0.006	37	3	2.01	2295.5	6.1	2.16
ST12NS	3.08	0.009	37	3	1.26	1020.2	9.8	2.16
ST19BS	2.34	0.010	34	3	3.51	759.4	3.2	2.35
ST19NS	2.78	0.010	34	3	1.91	759.4	5.9	2.35
ST20BS	2.16	0.003	31	3	4.50	7693.0	2.3	2.58
ST20NS	2.94	0.012	31	3	1.53	480.8	6.8	2.58

Il parametro di Dean è anche alla base delle classificazioni che tengono conto dell'escursione di marea (Masselink e Short, 1993; Masselink e Hegge, 1995), definendo un'escursione di marea "relativa" (*Relative Tidal Range*) ottenuta dividendo l'altezza d'onda modale alla frangenza per l'escursione media in condizioni di sizigie. Per ciascuno dei profili in Figura 7 si è utilizzato l'altezza d'onda calcola-

ta con il metodo descritto in precedenza, mentre l'escursione di marea sizigiale media è stata considerata uguale a 0.8 m. In Figura 7 sono indicati inoltre i livelli dell'alta (AMS) e della bassa (BMS) marea di sizigie, per aiutare nelle interpretazioni della morfologia. I risultati del calcolo degli indici morfodinamici vengono presentati in Tabella 1 (pagina precedente).

### Caratterizzazione morfodinamica delle spiagge

#### *Spiagge in prossimità della foce del Po di Goro*

I profili ST1 e ST4 presentati in Figura 7 mostrano la presenza di una barra ben definita a profondità comprese tra -1 e -2 s.l.m.m., ad una distanza tra i 300 ed i 600 m dalla battigia, costituita da sabbia fine. Mentre in prossimità della foce del Po di Goro la barra si presenta larga, costituita da sabbia molto fine e separata dalla battigia da un troguolo ben definito, allontanandosi lungo lo Scanno verso ovest, la barra diventa più "appuntita", il troguolo diventa più largo e sulla parte esterna della barra si trova silt. Da notare sul profilo ST4 la presenza di un "terrazzo di bassa marea" (Masselink e Short, 1993) a profondità di circa -0.5 m s.l.m.m. con larghezza sui 30 m, costituito da sabbia fine. Da notare che la classificazione morfodinamica di questi ultimi autori prevede uno stato di spiaggia al confine intermedio/dissipativo con presenza di sistema barra-troguolo, in accordo con ciò che si è rilevato. La barra potrebbe essere collegata all'input sedimentario della barra di foce del Po di Goro o addirittura essa potrebbe essere considerata la continuazione laterale di quest'ultima. Va infine puntualizzato come la battigia presenti valori di parametro di scala del *surf* minori rispetto ai valori ultradissipativi della spiaggia sommersa (Tab. 1).

#### *Spiagge nella parte centrale dello Scanno*

Al variare dell'orientazione della linea di costa si nota una corrispondente variazione della morfologia di spiaggia. Il profilo ST5 non mostra la presenza di un sistema barra-troguolo, ma piuttosto una zona a debole inclinazione a profondità tra -1 e -2 m s.l.m.m. occupata da sabbia fine e molto fine. La zona di battigia mantiene le pendenze elevate e la costituzione granulometrica (sabbia fine) osservate nei profili precedenti, con comportamento più riflettente rispetto alla spiaggia sommersa, con valori di parametro di scala del *surf* che prevedono minore probabilità di frangenti di tipo *spilling*. Mentre nel profilo ST5 il terrazzo di bassa marea non è osservabile, esso è presente nella sezione ST8, sempre a circa mezzo metro di profondità (con una larghezza di 40 m), così come osservato nel profilo ST4 ed è costituito da sabbia medio-fine. Da notare inoltre su quest'ultimo profilo di una ben definita "scarpata di erosione" della spiaggia, la cui battigia è costituita da sabbia medio-fine. Usando come criterio il parametro  $s$  si nota come nei precedenti profili un differente comportamento morfodinamico tra la battigia e la spiaggia sommersa; il parametro di Dean presenta, invece, valori uguali.

Il profilo S12 della Idroser risulta il più prossimo al ST8 di questo studio. La morfologia risulta essenzialmente comparabile, confermando una tendenza all'assenza della barra, nonostante che la classificazione di Masselink e Short (1993) predica un sistema intermedio-dissipativo con barra come nel caso precedente. L'assenza del sistema barra-troguolo potrebbe essere ricondotta alla tendenza erosiva di questo tratto di costa.

#### *Spiagge nella parte terminale dello Scanno*

Andando verso la propaggine occidentale dello Scanno, la barra continua a non essere presente (vedi profili ST20 e ST19), mentre al di sopra del livello -1 m s.l.m.m. si osservano delle piccole barre di battigia (*swash bars*), costituite da sabbia medio-fine, corrispondenti a piccoli digitazioni dello Scanno, che caratterizzano il meccanismo evolutivo della freccia litorale, come descritto da Simeoni et al. (1998b). Da notare che la classificazione di Masselink e Short prevede per queste spiagge uno stato morfodinamico meno dissipativo rispetto ai precedenti, nel caso del profilo ST20 quasi riflettente, con maggiore importanza del parametro di "escursione di marea relativa", il che potrebbe spiegare le ben formate barre intertidali.

I profili Idroser S6 e S8, eseguiti in questa porzione dello Scanno nel 1993, identificavano già queste morfologie di battigia, per quanto rilevavano sulla sezione S8 una barra poco pronunciata ad una profondità di circa -5 m s.l.m.m. Nel rilevamento oggetto di questo studio la barra non è stata osservata: ciò può essere dovuto a due ragioni. Potrebbe essere che la barra si trova subito oltre il limite verso mare dei profili (che si interrompono proprio alla -5 m s.l.m.m.) oppure che sia assente, essendo dovuta ad eventi di tempesta puntuali, poiché data la profondità a cui era stata rilevata dalla Idroser, non era sicuramente riconducibile alla normale azione del moto ondoso.

### *Spiagge sull'Isola-Scanno*

Anche sull'isola formatasi recentemente in seguito all'apertura artificiale della bocca orientale, la morfologia di spiaggia non presenta barre (vedi sezione ST12). Da notare la presenza sulla zona intertidale di una *swash bar* di sabbia fine. Il profilo ST12, secondo Masselink e Short (1993), sarebbe il più dissipativo di quelli considerati, dove barre multiple dovrebbero essere presenti. I profili Idroser S4 e S2, del 1993, evidenziano sistemi barra-troguolo a profondità comprese tra i -2 e -3 m, ora non più presenti. Inoltre, rispetto a cinque anni prima, il profilo ST12 ha pendenze molto inferiori. Il confronto con il rilievo Idroser è chiaramente più difficile di quanto fatto prima, essenzialmente perché l'area risulta estremamente cambiata rispetto al 1993-1994, essendo fortemente influenzata dall'idrodinamica della bocca piccola.

### **Conclusioni**

L'utilizzo della tecnica GPS in modalità "Cinematica" ha permesso un rilevamento accurato e rapido della linea di costa, per l'intera lunghezza dello Scanno e dell'isoletta che si è creata con l'apertura della bocca piccola.

Il confronto tra le linee di costa rilevate ed altre precedentemente ottenute con metodi fotogrammetrici ha identificato le zone più della fascia di costa più soggette a variazioni, permettendo di mappare in dettaglio morfologie di battigia, corrispondenti a zone di evoluzione della freccia litorale.

I profili di spiaggia hanno delimitato tre zone a diversa morfologia del sistema. Le spiagge più prossime alla foce del Po hanno sistemi barra-troguolo, che però scompaiono spostandosi verso la bocca piccola. Un altro elemento presente sulle spiagge orientali e centrali dello Scanno è un ben marcato terrazzo di bassa marea. La parte centrale dello Scanno riflette il meccanismo di evoluzione del sistema con la presenza di *swash bars* emergenti a bassa marea.

Il confronto con profili eseguiti cinque anni prima (Idroser, 1994), seppur non esattamente coincidenti con quelli di questo studio, ha identificato una variazione morfologica nella parte terminale dello Scanno e sull'isoletta, con scomparsa di barre lungocosta e nascita di *swash bars*.

### **Ringraziamenti**

Si ringraziano A. Bertoni, A. Borghesi, A. De Nardo, L. Zanetti, che hanno partecipato alle campagne di rilevamento, in particolare il Dott. Giorgio Fontolan per gli utili suggerimenti forniti e la disponibilità a partecipare ai rilevamenti. Si ringrazia inoltre l'equipaggio del battello Hydra per l'appoggio dato e G. Calderoni per l'assistenza in laboratorio. Lo studio è stato condotto con finanziamenti della Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura (responsabile U. Simeoni), ex 60% (responsabile U. Simeoni) e del fondo COFIN 98 (responsabile R. Dal Cin) del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (M.U.R.S.T.).

### **Bibliografia**

- Carobene L. e Brambati A. (1975) - *Metodo per l'analisi morfologica quantitativa delle spiagge* - Bollettino della Società Geologica Italiana, 94: 479-493.
- Ciavola P. (1991) - *Spurn Heritage Coast: un esempio di modellistica costiera e salvaguardia ambientale* - Memorie della Società Geologica Italiana, 47: 685-700.

- Ciavola P. (1997) - *Coastal Dynamics and Impact of Coastal Protection Works on the Spurn Head Spit (United Kingdom)* - Catena, 30: 369-389.
- Dail H.J., Merrifield M.A. e Bevis M. (2000) - *Steep beach morphology changes due to energetic wave forcing* - Marine Geology, 162: 443-458.
- Dal Cin R. (1994) - Lo scannone di Goro nel Delta del Po: evoluzione morfologica e possibili interventi per conservare l'ambiente della laguna retrostante - In: *Sacca di Goro: studio integrato sull'ecologia*, FrancoAngeli, Ferrara, pp. 291-303.
- Dean R.G. (1973) - *Heuristic models of sand transport in the surf zone* - Proceedings of the Conference on Engineering Dynamics of the Coastal Zone, Sidney, N.S.W., Australia, pp. 208-214.
- Folk R.L. (1974) - *Petrology of Sedimentary Rocks* - Hemphill Publishing Company, Austin, Texas, USA, pp 183.
- Gatti M. (1996) - *L'utilizzo della rete internazionale IGS per la determinazione delle coordinate di vertici GPS*. Bollettino della SIFET, 3: 105-120.
- Gatti M., Pellegrinelli A. e Russo P. (1995) - *Un contributo allo studio sperimentale del sistema GPS "Real Time Kinematic Survey" - On The Fly*. Bollettino della SIFET, 3: 107-116.
- Gorman L., Morang A. e Larson R. (1998) - *Monitoring the coastal environment; part IV: mapping, shoreline changes, and bathymetric analysis* - Journal of Coastal Research, 14: 61-92.
- Guza R.T. e Inman D.L. (1975) - *Edge waves and beach cusps*. - Journal of Geophysical Research, 80: 2997-3012.
- Hallermeier R.J. (1981) - *Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains* - Sedimentology, 28: 859-865.
- Hydrographic Office (1991) - *Tidal prediction by the Admiralty simplified harmonic method*. Version 2.0, Hydrographic Office, Tauton, UK.
- Idroser (1996) - *Progetto di Piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia Romagna*. Regione Emilia Romagna, Bologna. pp. 365.
- Irish J.L. e Lillycrop W.J. (1999) - *Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system* - ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54: 123-129.
- Masselink G. e Hegge B. (1995) - *Morphodynamics of meso- and macrotidal beaches: examples from central Queensland, Australia* - Marine Geology, 129: 1-23.
- Masselink G. e Short A.D. (1993) - *The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model* - Journal of Coastal Research, 9: 785-800.
- Med Ingegneria (1998) - *Applicazioni di modellistica numerica per lo studio dell'evoluzione dello scanno della Sacca di Goro e l'analisi idrodinamica delle bocche lagunari*. Med Ingegneria, S.r.l., Ferrara.
- Rijkswaterstaat (1990) - *A new coastal defence policy for the Netherlands* - Rijkswaterstaat, Gravenhage, Paesi Bassi, pp. 103.
- Simeoni U., Borghesi A., Calderoni G., Ciavola P., Fontolan G., Gatti M., Gonella M., Tessari U. e Zamariolo A. (1998a) - *Analisi previsionale dell'evoluzione dello Scanno e della Sacca di Goro. Relazione finale*. Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura, Servizio Sviluppo Agro-alimentare, Bologna. pp 273.
- Simeoni U., Ciavola P., Fontolan G., Mazzini E. e Tessari U. (1998b) - *Centennial evolution of a recurved spit: a case study from the spit of the Goro Lagoon, Po Delta Italy* - 35th CIESM Congress Proceedings, CIESM, Dubrovnik, pp. 100-101.
- Wright L.D. e Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis* - Marine Geology, 56: 93-118.

Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 3/4/2000.

## Caratteri geochimici dei depositi attuali della Sacca di Goro (Delta del Po)

Enrico Dinelli<sup>1</sup>, Giovanni Gabbianelli<sup>1</sup> e Umberto Tessari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scienze Ambientali, Università di Bologna, via degli Ariani, 1- 48100 Ravenna

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara  
C.so Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara

### Riassunto

L'attuale sedimentazione all'interno della Sacca di Goro, prevalentemente fine e ricca in biodepositi e sostanza organica, condiziona la distribuzione dei metalli pesanti che raggiungono le maggiori concentrazioni nelle zone centro-orientali dell'area. Pb, Cu e Zn sembrano essere in parte condizionati anche dalla presenza di materia organica che, in queste condizioni, ha modo di concentrarsi e conservarsi. Il confronto con i sedimenti del Po evidenzia che Pb e Zn risultano concentrati rispetto alla composizione del più importante sistema di alimentazione dell'area. Per altro, proprio questi elementi, insieme al Cu e così come evidenziato dal confronto con tenori di fondo misurati in aree limitrofe, risultano quelli più influenzati dalle attività antropiche.

### Introduzione

Nell'ambito delle ricerche interdisciplinari condotte negli ultimi anni sulla Sacca di Goro (Fig. 1) in collaborazione tra Università di Ferrara e Bologna, è stata eseguita una serie di campionature al fine di delineare le principali caratteristiche geochimiche degli attuali depositi sedimentari.

Come noto, infatti, i fondali della Sacca, prevalentemente costituiti da materiali fini (Fig. 2) e ricchi in sostanza organica anche per le periodiche crisi anossiche che vi si sviluppano (Viaroli e Fumagalli, 1991; Barbanti et al., 1992; Azzoni et al., 1999), risentono in modo considerevole degli apporti di acque dolci delle reti di bonifica ferrarese, bassa modenese e oltrepò mantovano, le cui colatizie, canali e chiaviche scolano acque nel Po di Goro, di Volano o nel Canal Bianco, contribuendo così a conferirgli una salinità media normalmente inferiore al 28‰ (Bondesan, 1988).

A questi si sono probabilmente aggiunte negli ultimi decenni significative quantità di biodepositi derivanti dalla intensiva vallicoltura (vongole, mitili, ecc) che, unitamente alla pesca, rappresenta la più importante attività economica dell'area.

E' ovvio quindi che la conoscenza dei parametri chimici del substrato su cui queste attività economiche si impostano assume particolare rilevanza e la valutazione di un eventuale grado di inquinamento dell'area rappresenta un parametro di primaria importanza. Sorgenti locali di inquinamento possono essere sporadicamente importanti, ma il maggior carico di sostanze inquinanti nell'area dovrebbe essere trasportato dagli immissari (Po di Volano, Canale Bianco, Po di Goro) e ridistribuiti all'interno dell'ambiente lagunare secondo uno schema circolatorio del tipo di quello delineato in Figura 1.

In questo lavoro una valutazione della qualità dei sedimenti superficiali della Sacca di Goro verrà effettuata prendendo a riferimento i dati relativi ai sedimenti trasportati dal fiume Po (Dinelli e Lucchini, 1999) considerati quelli quantitativamente più importanti nel regime deposizionale dell'area.

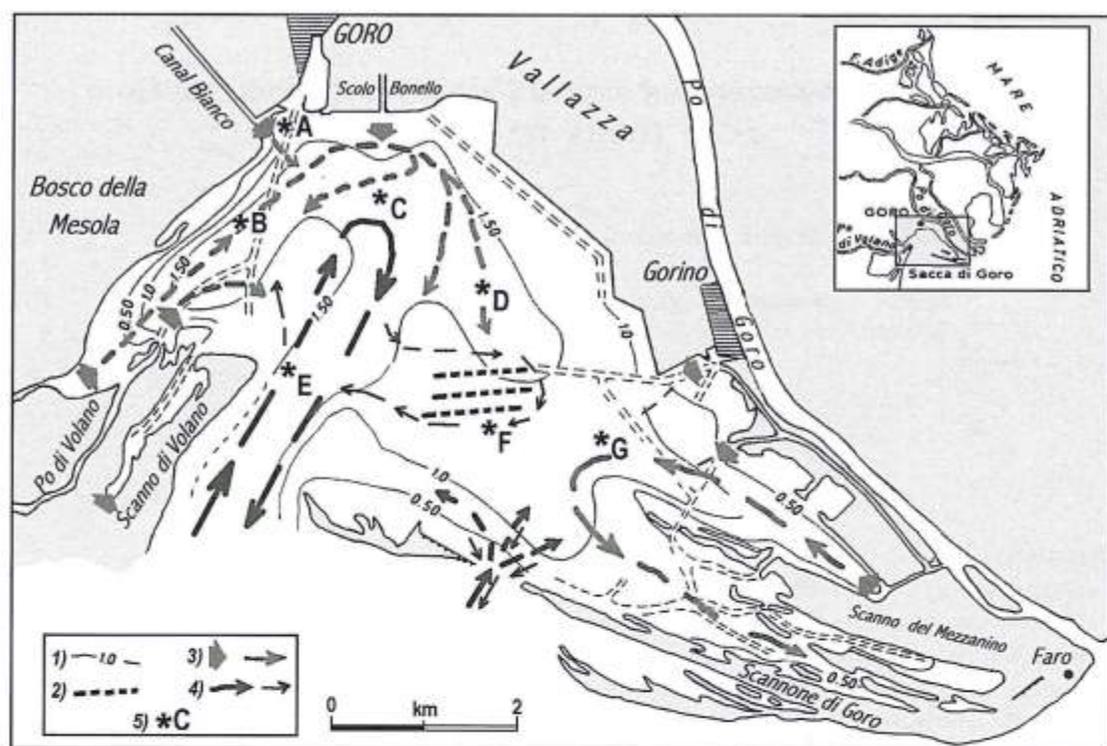


Figura 1 - Schema geomorfologico ed idrologico della Sacca di Goro con ubicazione delle campionature effettuate (da Aquater, 1990 e Lamberti, 1998, mod.).

### Assetto geografico- ambientale della Sacca

La Sacca di Goro, che attualmente si estende su un'area di circa 24,5 km<sup>2</sup>, presenta profondità medie dell'ordine dei 0.50 – 1.50 m metri ed in base alla sua morfologia e caratteristiche idrodinamiche può essere suddivisa in due settori a diverse caratteristiche (Fig. 1; Simeoni, 1998). Il primo, centro-occidentale, è caratterizzato dagli apporti del Po di Volano, del Canal Bianco e dello Scolò Bonello che determinano un flusso di acque dolci prevalentemente confinato nelle porzioni più interne e costiere. Nella zona più esterna e in quelle centrali si sviluppa invece il canale navigabile (artificialmente mantenuto a profondità di 2- 3 m circa per permettere l'accesso al Porto di Goro) che, con andamento nord-sud ed ampio 1, 25 km circa, rappresenta la via di maggior interscambio delle acque interne con il mare aperto. Interscambio controllato soprattutto da un regime microtidale (escursione media di marea dell'ordine dei - 40 / + 80 cm), prevalentemente limitato a questa porzione centro-occidentale in cui, per altro, si sviluppano alcuni impianti di miticoltura (Fig. 1). Per contro, l'opposto settore orientale, più ampio e centrato sullo Scannone o Piallazza che confina la Sacca verso mare, presenta fondali meno profondi (mediamente inferiori al metro) ed articolati per lo sviluppo di vaste aree barenicole la cui estensione varia sensibilmente con la marea. Queste ultime rappresentano in genere i residui dei sistemi di frecce litoranee che nell'ultimo secolo circa si sono alternati sul lato sottocorrente (occidentale) della Foce del Po di Goro (Dal Cin 1994; Simeoni et al., 1998).

In questo settore gli interscambi con le acque marine sono in genere limitati e localizzati in corrispondenza di una bocca secondaria dello Scannone (artificialmente aperta nel 1992 a tale scopo e progressivamente allargatasi sino alle attuali dimensioni; Fig. 1). Le acque dolci provengono pressochè totalmente dal Po di Goro attraverso un sistema di chiuse e canali di recente costruzione e tali flussi risultano del tutto confinati nell'area (Lamberti, 1998; Simeoni et al., 1998). Anche in

quest'area orientale, per altro, l'originario intreccio di canali mareali, che ne assicuravano l'officiosità idraulica, è stato profondamente alterato da tutta una serie di interventi artificiali.

In tal senso, recenti modelli sull'idrodinamica e sui fenomeni di trasporto-dispersione registrabili all'interno della Sacca evidenziano come la marea non sia oggi più sufficiente, allontanandosi progressivamente dalle bocche lagunari, ad evitare ampie zone di sofferenza negli scambi idrici così come una flottazione ristretta e, soprattutto, mai in uscita, nei settori più interni ed orientali della sacca (Lamberti, 1998).

### Materiali e metodi analitici

Le campionature, opportunamente distribuite ai fini di risultare il più possibile rappresentative in funzione delle caratteristiche sedimentologiche ed idrodinamiche della Sacca (oltre che comparabili con precedenti indagini; Fagioli et al., 1991, 1994; Simeoni et al., 1998), sono state effettuate una prima volta nell'Aprile 1997 e ripetute poi nelle stesse posizioni (attraverso un sistema GPS differenziale che ha garantito precisioni relative di circa 1 m) nel successivo mese di Ottobre; esse sono in tal modo rappresentative di condizioni generali della Sacca sia di tipo invernale che estivo. In Figura 1 sono riportate le posizioni di ogni prelievo effettuato attraverso una benna del tipo "Ehkmann" da 250 cm<sup>3</sup>. Sui campioni così raccolti sono state svolte analisi granulometriche tramite setacciatura a secco, separando la frazione sabbiosa da quella pelitica (vaglio a 63 µm).

La loro composizione chimica è stata valutata tramite spettrometria per fluorescenza di raggi X (XRF) utilizzando uno spettrometro Philips PW1480 con tubo ad anticatodo di Rh seguendo i metodi proposti da Franzini et al. (1972, 1975), Leoni e Saitta (1976) e Leoni et al. (1982) per la correzione degli effetti di matrice. Per le analisi sono stati utilizzati 0,5 gr di campione pressati su un supporto di acido bórico. Accuratezza e precisione, valutate utilizzando standard internazionali come riferimento, sono risultate migliori del 5% tranne che per gli elementi presenti a tenori < 10 ppm (10-15%). Il contenuto in elementi volatili, indicato dalla sigla LOI, è stato determinato gravimetricamente dopo riscaldamento per 12 ore a 950°C.

Sugli stessi campioni sono stati valutati anche i tenori di C<sub>totale</sub>, C<sub>organico</sub> e di N<sub>totale</sub>, utilizzando un analizzatore elementare Carlo Erba CHN/S Analyzer, seguendo le metodologie standardizzate per l'analisi di questi elementi su sedimenti che prevedono l'attacco dei carbonati con HCl diluito per la determinazione del C<sub>organico</sub>.

### Risultati e discussione

#### Granulometria

I risultati delle analisi granulometriche svolte sui campioni, riportate in Tabella 1 ed in Figura 2, evidenziano una prevalenza di sedimenti fini nelle zone nord-orientali della Sacca, come già verificato da Dal Cin e Pambianchi (1991), abbastanza simile in entrambi i periodi di campionamento.

Tabella 1 - Caratteristiche granulometriche dei campioni.

Stazione	Aprile		Ottobre	
	% Sabbia fine	%Pelite	%Sabbia fine	% Pelite
1	64.2	35.8	84.6	15.4
3	2.3	97.7	15.1	85.9
4	3.2	96.8	2.4	97.6
16	25.5	74.5	31.1	68.9
17	3.5	96.5	2.6	97.4
22	56.3	43.7	51.4	48.6
23	15.3	84.7	27.2	72.8

Sedimenti leggermente più grossolani (circa 30% di sabbia) caratterizzano la stazione 16, allo sbocco del Canal Bianco e la stazione 22, localizzata vicino ad una delle bocche di entrata nella Sacca, che mostra una granulometria media più grossolana, con contenuti in sabbia in entrambe le campionature superiori al 50%. L'unica stazione che mostra sensibili variazioni stagionali nella granu-

lometria del sedimento è la stazione 1, a sabbia prevalente nella campionatura di Aprile, più fine nella campionatura di Ottobre.

### Analisi chimica degli elementi maggiori

I risultati delle analisi svolte sui sedimenti superficiali prelevati nelle due campagne di campionamento sono riportati in Tabelle 2 e 3. Il sedimento non è stato preventivamente trattato per eliminare eventuale acqua salata intrappolata e ciò spiega i tenori elevati di  $N_2O$  e S che non sono stati considerati nell'interpretazione.

Tabella 2 - Elementi maggiori contenuti nei sedimenti superficiali della Sacca di Goro, nelle due campionature di Aprile e Ottobre 1997.

	Aprile								Ottobre								
	1	3	4	6	16	17	22	23	1	3	4	6	16	17	22	23	Po <sup>a</sup>
SiO <sub>2</sub>	46.04	42.62	41.07	50.39	45.93	42.14	46.68	41.28	31.25	42.60	42.21	43.51	51.82	43.13	48.16	33.86	47.33
TiO <sub>2</sub>	0.48	0.54	0.50	0.25	0.49	0.49	0.44	0.53	0.37	0.52	0.52	0.52	0.49	0.49	0.46	0.45	0.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.56	13.04	12.67	8.08	12.07	12.91	10.43	12.50	9.70	12.89	12.88	12.74	9.98	12.35	10.89	10.62	13.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.27	5.45	5.31	2.74	4.78	5.13	4.19	5.19	3.96	5.11	5.62	5.74	4.30	4.88	4.46	4.42	5.29
MnO	0.13	0.12	0.13	0.11	0.13	0.13	0.13	0.14	0.11	0.11	0.14	0.14	0.15	0.12	0.12	0.12	0.15
MgO	3.37	4.04	4.09	2.43	3.63	4.26	3.36	3.76	3.33	4.15	4.27	3.76	3.36	4.23	3.86	3.48	4.09
CaO	12.91	9.12	9.03	14.80	8.35	7.83	9.29	11.74	16.98	8.76	9.67	8.66	11.45	8.25	9.72	16.71	13.45
Na <sub>2</sub> O	2.78	3.09	3.69	3.40	2.81	4.11	2.59	2.69	3.62	3.63	3.22	2.74	2.83	4.49	4.18	2.63	0.86
K <sub>2</sub> O	2.10	2.54	2.49	2.02	2.34	2.39	1.93	2.43	1.86	2.44	2.49	2.48	1.97	2.26	2.04	2.09	2.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.12	0.12	0.09	0.11	0.13	0.13	0.10	0.11	0.11	0.13	0.14	0.13	0.13	0.14	0.11	0.15
LOI	17.25	19.32	20.91	15.67	19.35	20.49	20.82	19.64	28.70	19.67	18.85	19.55	13.52	19.66	15.97	25.52	12.79
CO <sub>2</sub>	6.75	8.54	6.12	9.86	7.74	6.49	8.95	6.71	8.84	7.11	5.46	3.81	8.87	5.68	6.93	7.48	
Corg	1.21	1.50	2.40	0.89	1.22	1.82	0.85	1.55	2.20	2.00	2.10	2.90	0.80	1.90	0.90	2.50	
N	0.06	0.25	0.28	0.03	0.17	0.22	0.14	0.12	0.28	0.26	0.27	0.30	0.09	0.21	0.05	0.33	

<sup>a</sup> dati da Dinelli e Lucchini (1999)

I sedimenti sono principalmente costituiti da una componente silicoclastica e da una componente carbonatica. Come mostrato in Figura 3 la relazione negativa esistente tra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO conferma la reciprocità delle componenti mentre una analoga correlazione negativa tra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> suggerisce un loro legame con componenti diverse, rispettivamente una componente fine ed una componente grossolana costituita prevalentemente da quarzo.

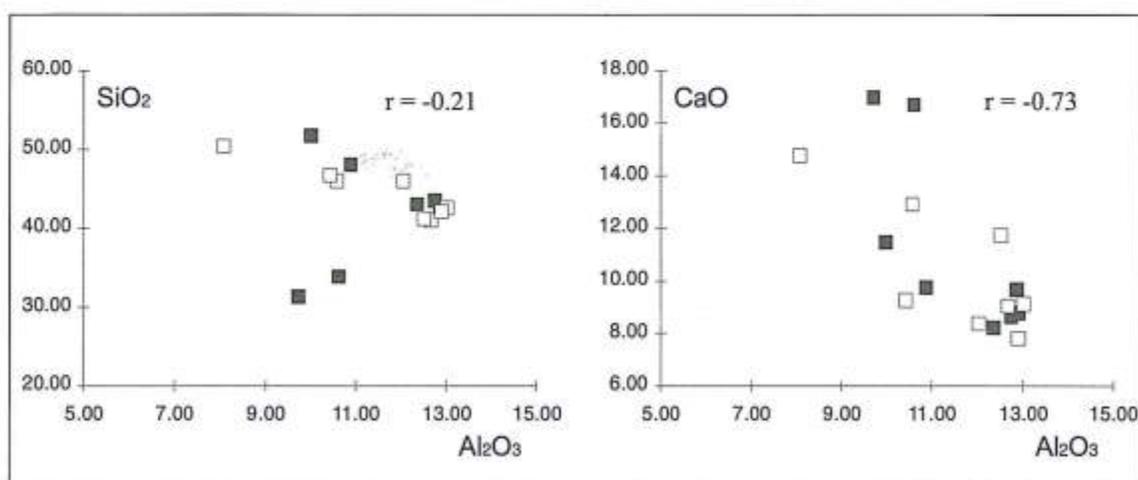


Figura 3 - Relazione SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a) e CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b) nei sedimenti superficiali della Sacca di Goro (quadrato pieno: campionatura Ottobre; quadrato vuoto: campionatura Aprile). In entrambi i casi, pur con qualche eccezione, è evidente una correlazione negativa tra gli elementi. (coefficienti di correlazione espressi come "r").

Tabella 3 - Elementi in traccia contenuti nei sedimenti superficiali della Sacca di Goro, nelle due campionature di Aprile e Ottobre 1997.

	Aprile								Ottobre								Po <sup>a</sup>
	1	3	4	6	16	17	22	23	1	3	4	6	16	17	22	23	
Sc	12	13	11	9	11	13	11	13	12	11	13	14	14	9	12	15	16
V	77	106	98	43	93	97	76	97	72	103	100	103	73	89	76	87	91
Cr	199	208	190	106	190	193	205	199	141	202	203	207	202	185	198	169	196
Co	15	18	18	8	18	17	13	16	8	17	18	22	12	14	11	13	16
Ni	104	123	118	75	115	113	107	124	94	116	120	123	105	105	104	113	126
Cu	38	56	50	25	37	48	32	52	39	53	60	52	30	43	34	48	53
Zn	108	177	157	72	104	146	111	144	117	170	162	159	94	139	114	151	129
Ga	14	16	16	13	13	14	13	15	15	15	16	17	15	14	15	16	9
Rb	90	129	122	73	117	106	78	116	93	114	120	121	75	105	68	99	84
Sr	429	312	320	406	344	234	248	390	693	295	325	305	291	252	203	625	270
Y	19	21	19	9	25	18	21	18	14	18	18	23	23	19	15	16	20
Zr	122	120	112	55	159	110	161	121	76	117	117	121	190	126	115	84	132
Nb	10	13	14	6	14	11	11	14	11	12	16	13	12	14	11	9	10
Ba	237	261	239	283	267	245	247	273	178	271	274	284	241	237	249	225	336
La	23	28	24	13	25	24	21	27	22	25	27	31	24	26	27	27	28
Ce	60	63	64	21	50	52	43	50	42	55	58	59	61	56	39	44	42
Pb	32	50	41	22	28	31	23	39	31	55	45	36	22	32	18	35	34
Th	7	9	12	9	16	11	9	9	4	10	11	7	13	13	13	11	7
S	3446	8417	9539	3811	9832	8657	1534	7155	6175	7878	11484	7240	3508	9194	3624	6452	383

<sup>a</sup> dati da Dinelli and Lucchini (1999)

### Variazioni stagionali

Il confronto tra le due campionature (Fig. 4) evidenzia una differenza particolarmente marcata per la stazione 6, localizzata alla fronte della foce del Po di Volano, la marcata diminuzione dei carbonati ed un marcato aumento di tutti gli elementi legati alla componente argillosa del sedimento suggeriscono l'aumento della componente detritica silicoclastica.

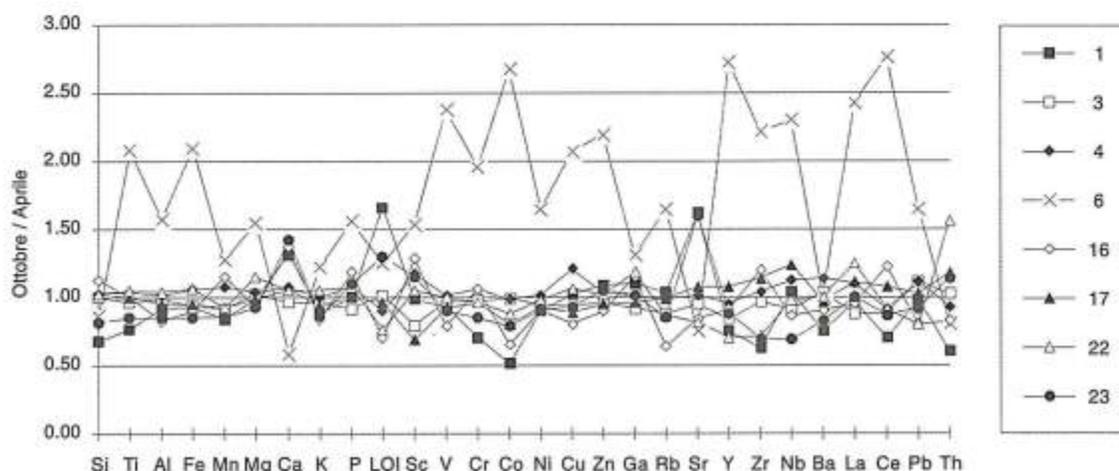


Figura 4 - Confronto tra i risultati delle campionature (Ottobre/Aprile). La stazione 6 mostra le maggiori differenze tra le due campionature. Minori differenze interessano i siti 1, 23 e 16, che hanno una componente carbonatica più abbondante nella campionatura di Ottobre.

Questa è una zona in cui gli apporti da terra rappresentano la principale fonte di alimentazione del sedimento (Barbanti et al., 1992), e quindi significative variazioni nella composizione potrebbero essere condizionate dall'andamento della dinamica fluviale.

Minori differenze riguardano altre tre stazioni (16, 1 e 23) principalmente legate ad una maggiore importanza della componente carbonatica nel periodo autunnale, mentre le altre stazioni non evidenziano alcuna differenza sistematica.

### Distribuzione dei metalli pesanti

Studi precedenti (Fagioli et al., 1991; 1994) relativi alla valutazione dello stato di inquinamento della Sacca di Goro da metalli pesanti avevano suggerito un significativo inquinamento da Cr e Ni ed un moderato inquinamento da Cu e Zn.

Le relazioni esistenti tra i metalli pesanti analizzati nel presente studio e l' $Al_2O_3$  (Fig. 5) evidenziano una relazione positiva, con grado di correlazione variabile da elemento a elemento, ed è generalmente buono per Ni e Co e Cr, mentre altri elementi (Cu, Zn e Pb) mostrano una dispersione leggermente maggiore. E' lecito attendersi le concentrazioni maggiori dei metalli nelle zone della Sacca dove la sedimentazione è a dominante argillosa: la zona orientale della Sacca di Goro rappresentata dalle stazioni 23, 3 e 4. Il confronto di questi stessi elementi con il contenuto in Corg (Fig. 6) evidenzia una correlazione positiva con Cu, Zn e Pb, per i quali quindi si può supporre un ruolo importante della sostanza organica nel controllarne la distribuzione. Questo giustificerebbe anche il più basso grado di correlazione osservata tra questi elementi e  $Al_2O_3$ .

Sedimenti a dominante argillosa favoriscono una minore ossigenazione del sedimento e quindi un maggiore potenziale di preservazione della sostanza organica.

L'assenza o la scarsa correlazione degli altri tre elementi indicano che la componente silicoclastica del sedimento ricopre un ruolo fondamentale nella loro distribuzione, scarsamente condizionata da altri fattori nel sedimento.

### Qualità dei sedimenti

La valutazione dello stato di inquinamento da metalli pesanti in un ambiente ristretto come questo deve considerare quelli che sono gli apporti dei principali tributari, in questo caso il Po di Volano ed il Po di Goro. I dati presentati da Dinelli e Lucchini (1999) relativi a sedimenti di fondo trasportati dal Po (Tab. 2) sono stati utilizzati per valutare la qualità del sedimento.

Il risultato del confronto (Fig. 7) evidenzia come le concentrazioni sia pur elevate di elementi come Cr, Ni, e Co osservate nel sedimento non siano in realtà molto diverse da quelle osservate nei sedimenti del fiume Po. Differenze sistematiche esistono per i valori della LOI, probabilmente condizionati da alti valori di materia organica presente nei sedimenti (come riportato da Azzoni et al., 1999) vista la mancanza di correlazione con CaO. Solo due siti, 1 e 23 nella campionatura relativa al mese di Ottobre, hanno alti valori di CaO, al quale si associa anche Sr, e chiaramente indicatori di accumulo di detrito carbonatico. I metalli pesanti non mostrano sostanziali differenze con i sedimenti del Po anche se nelle stazioni 3 e 4 Zn e Pb, mostrano arricchimenti di circa 1,5x rispetto ai valori del fiume Po.

Studi svolti in zone limitrofe (Amorosi et al., 1999; Dinelli, 1999; Dinelli et al. 1999) su dati relativi a campioni di sondaggi hanno evidenziato che alti valori di Cr, Co e Ni cominciano a comparire dal passaggio Pleistocene-Olocene nell'area e sono quindi da ritenersi indicatori di provenienza del sedimento e non testimoni di inquinamento. Questi stessi dati sono stati utilizzati come stima dei tenori di fondo per la valutazione della qualità dei sedimenti fluviali (Dinelli et al., 1999) evidenziando che i sedimenti attuali del fiume Po risultino inquinati soprattutto da Cu, Pb e Zn. Ciò significa che nella Sacca di Goro questi elementi, come abbiamo visto anche più concentrati rispetto ai sedimenti fluviali, sono potenzialmente inquinanti, mentre Cr, Co e Ni mostrano concentrazioni confrontabili con quelle comuni nell'area già dal limite Pleistocene-Olocene e quindi una loro origine antropica è da ritenersi decisamente ridotta.

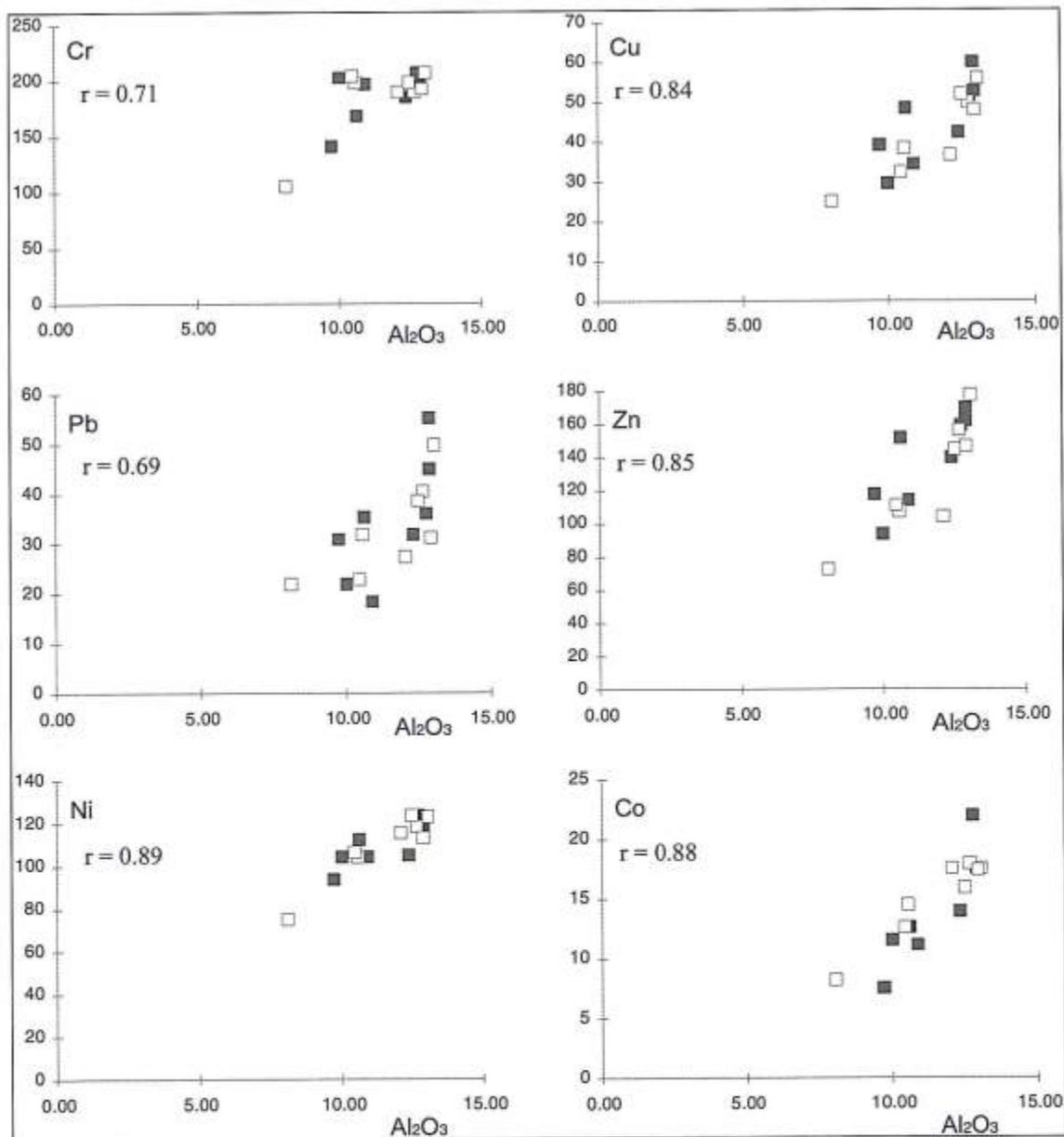


Figura 5 - Relazione tra  $Al_2O_3$  ed alcuni metalli pesanti nei sedimenti superficiali della Sacca di Goro (simboli come in Fig. 2). Il buon grado di correlazione tra i parametri suggerisce un controllo importante della componente argillosa del sedimento sulla distribuzione di questi metalli. (coefficienti di correlazione espressi come "r").

### Conclusioni

La sedimentazione fine all'interno della Sacca di Goro, localizzata nelle zone centro-orientali della laguna, condiziona in maniera importante la distribuzione dei metalli pesanti che in queste zone raggiunge le maggiori concentrazioni. Pb, Cu e Zn sembrano essere condizionati in parte anche dalla presenza di materia organica, che in queste condizioni ha modo di concentrarsi e conservarsi.

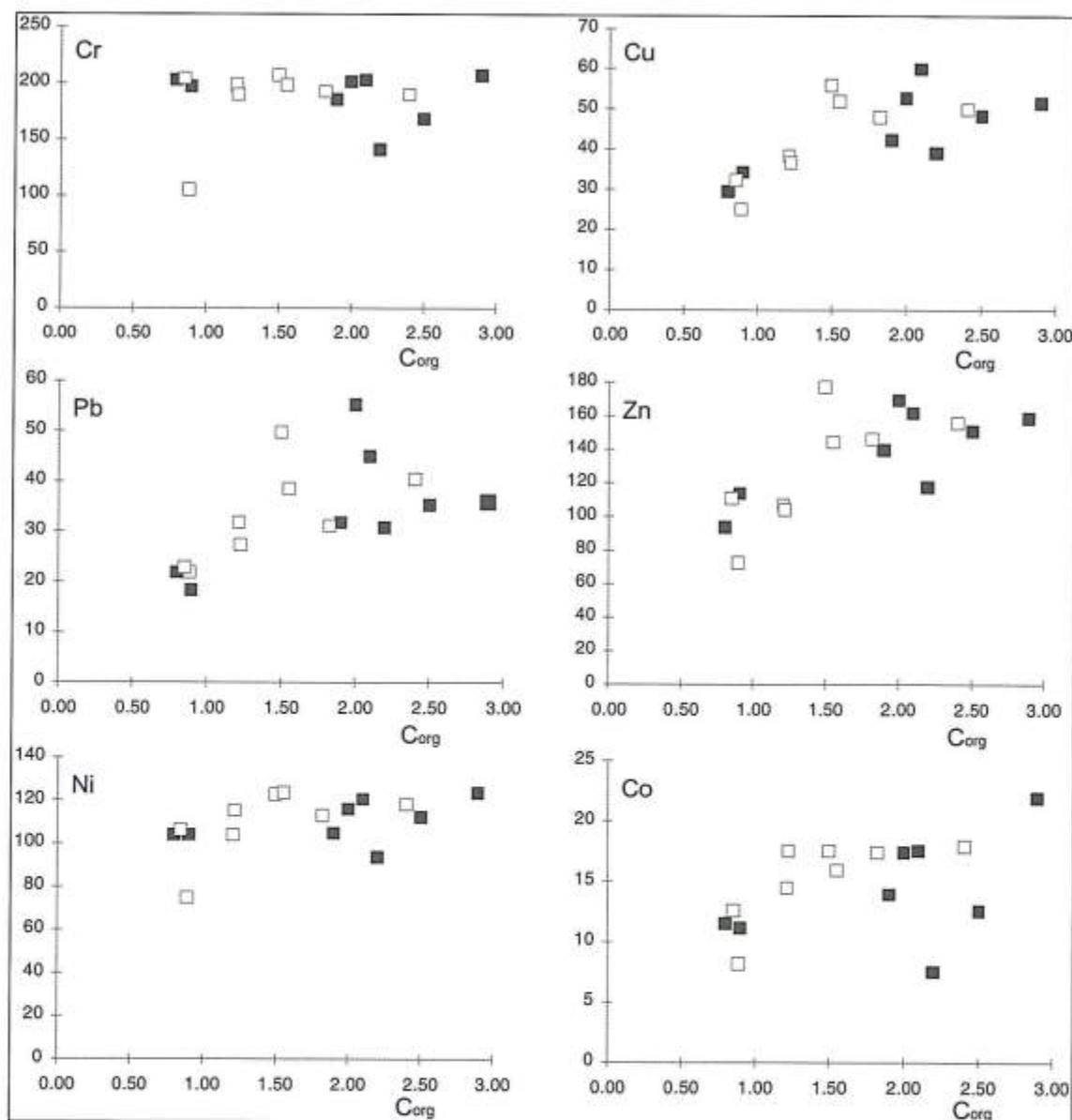


Figura 6 - Relazione tra C<sub>org</sub> e gli stessi elementi di Figura 5 nei sedimenti superficiali della Sacca di Goro (simboli come in Figura 3).

Il confronto con i sedimenti del Po evidenzia che Pb e Zn risultano concentrati nella zona della Sacca di Goro rispetto alla composizione del più importante sistema di alimentazione dell'area. Proprio questi elementi insieme al Cu sono risultati gli elementi più influenzati dalle attività antropiche nell'area, come risulta dal confronto con tenori di fondo misurati in aree limitrofe.

### Ringraziamenti

Le analisi alla fluorescenza a raggi-X si sono rese possibili grazie alla collaborazione del Dott. Alceo Mordenti del Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali dell'Università di Bologna. Per le analisi di C<sub>org</sub> e N si ringrazia il Centro Studi Ambientali di Rimini.

Lavoro svolto con fondi ex- 60% dell'Università di Bologna (Resp. G. Gabbianelli).

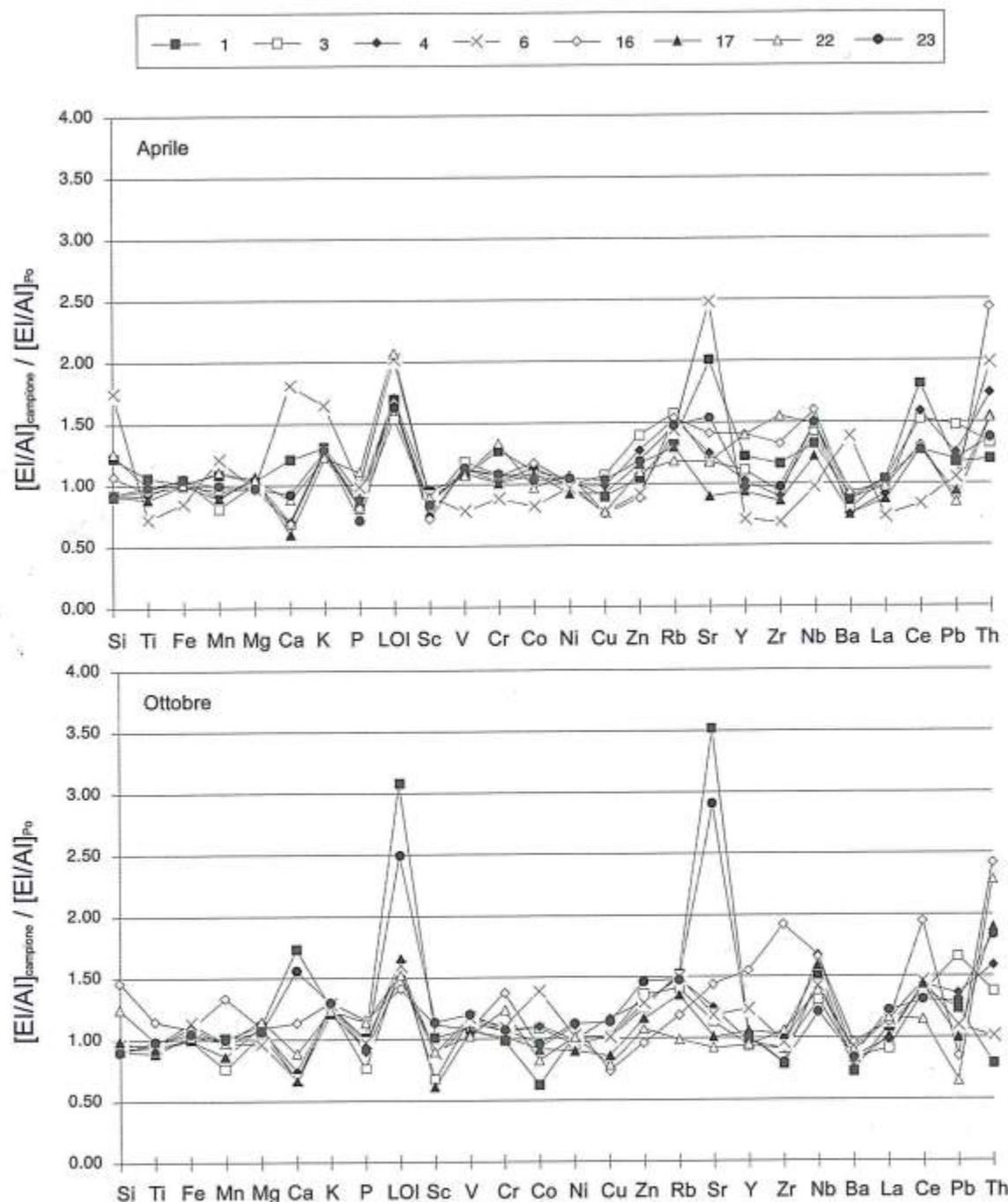


Figura 7 - Confronto tra i dati dai sedimenti superficiali della Sacca di Goro ed i sedimenti attuali del fiume Po (dati in Tab. 2). In grafico sono riportati i valori dei fattori di arricchimento  $[(Ei/Al)_{campione} / (Ei/Al)_{arricchimento}]$  in modo da ridurre l'effetto diluente di carbonati e materiale grossolano.

### Bibliografia

Amorosi A., Centineo M.C., Dinelli E., Lucchini F. e Tateo F. (1999) - *Provenance changes across the Pleistocene/Holocene boundary in the south-eastern Po-Plain*. In: H. Ámannsson (Ed.) *Geochemistry of the Earth Surface (GES-5, Reykiavik, 16-20 Agosto 1999)*. Balkema, Rotterdam: 23-26.

- Aquater (1990) – *Piano di risanamento della Sacca di Goro*. Relazione finale, Amministrazione Provinciale di Ferrara. pp. 76.
- Azzoni R., Giordani G., Gazzola S. e Bonoli M. (1999) - *Accumulation of phosphorus in relation to iron and sulphur in the surficial sediments of three coastal lagoons: Sacca di Goro, Valle Smarlacca (Italy) and Arcachon Bay (France)*. *Atti AIOL*, 13: 75-84.
- Barbanti A., Ceccherelli V.U., Frascari F., Rosso G. e Reggiani G. (1992) - *Nutrient release from sediments and the role of bioturbation in the Goro Lagoon (Italy)*. In: Vollenweider R.A., Marchetti R., Viviani R. (eds): "Marine coastal eutrophication". Elsevier, Amsterdam: 475-487.
- Dal Cin R. (1994) - *Lo Scannone di Goro nel Delta del Po: evoluzione morfologica e possibili interventi per conservare l'ambiente della laguna retrostante*. In: Bencivelli S., Castaldi N. e Finessi D. (a cura di) *Sacca di Goro: studio integrato sull'ecologia - 2° anno di ricerche*. Provincia di Ferrara, Franco Angeli, Milano: 291- 303.
- Dal Cin R. e Pambianchi P. (1991) - *I sedimenti nella Sacca di Goro*. In: Bencivelli S. e Castaldi N. (a cura di) *Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro*. Provincia di Ferrara, Franco Angeli, Milano: 253- 263.
- Dinelli E. (1999) - *Caratteristiche geochimiche dei sedimenti*. In: Amorosi A. (a cura di): *Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, F° 223 Ravenna*: 135-139.
- Dinelli E. e Lucchini F. (1999) *Sediment supply to the Adriatic sea basin from the Italian rivers: geochemical features and environmental constraints*. *Giornale di Geologia*, 61, 121-132
- Dinelli E., Amorosi A., Centineo M.C. e Lucchini F. (1999) - *Geochimica dei sedimenti sepolti della Pianura Padana - uno strumento per valutare la qualità dell'ambiente*. "Conoscenza e salvaguardia delle aree di pianura", Ferrara, 8-11 Novembre 1999: 159-162.
- Fagioli F., Landi S., Locatelli C. e Vecchiotti R. (1991) - *Valutazione del carico di metalli nelle acque, nei sedimenti e nei principali organismi accumulatori*. In: Bencivelli S. e Castaldi N. (a cura di) *Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro*. Provincia di Ferrara, Franco Angeli, Milano: 135-172.
- Fagioli F., Righini F., Landi S. e Locatelli C. (1994) - *Valutazione del carico di metalli nelle acque, nei sedimenti e nei principali organismi accumulatori (Aprile 1990 - Marzo 1991)*. In: Bencivelli S., Castaldi N. e Finessi D. (a cura di) *Sacca di Goro: studio integrato sull'ecologia - 2° anno di ricerche*. Provincia di Ferrara, Franco Angeli, Milano: 177-226.
- Franzini M., Leoni L. e Saitta M. (1972) - *A simple method to evaluate the matrix effects in X-Ray fluorescence analysis*. *X-Ray Spectrom.*, 1: 151-154.
- Franzini M., Leoni L. e Saitta M. (1975) - *Revisione di una metodologia analitica per fluorescenza-X, basata sulla correzione completa degli effetti di matrice*. *Rend. Soc. It. Min. Petrol.*, 31: 365-378.
- Lamberti P. (1988) - *Opere di Somma urgenza per la movimentazione naturale delle acque all'interno della Sacca di Goro*. Progetto esecutivo: relazione idraulica. Amm. Provinciale di Ferrara.
- Leoni L. e Saitta M. (1976) - *X-ray fluorescence analysis of 29 trace elements in rock and mineral standard*. *Rend. Soc. It. Min. Petrol.*, 32: 497-510.
- Leoni L., Menichini M. e Saitta M. (1982) - *Determination of S, Cl, and F in silicate rocks by X-Ray fluorescence analyses*. *X-Ray Spectrom.*, 11: 156-158.
- Simeoni U., Borghesi A., Calderoni G., Ciavola P., Fontolan G., Gatti M., Gonella M., Tessari U. e Zamariolo A., (1998) - *Analisi previsionale dell'evoluzione dello Scanno e della Sacca di Goro*. Relazione finale, Regione Emilia-Romagna. pp. 273.
- Viaroli P., Fumagalli L. e Cavalca M. (1991) - *Chemical composition and decomposition of Ulva rigida in a coastal lagoon (Sacca di Goro, Po River Delta)*. In: Vollenweider R.A., Marchetti R., Viviani R. (eds): "Marine coastal eutrophication". Elsevier, Amsterdam: 471- 474.

## I foraminiferi bentonici della Sacca di Goro (Italia) e la loro possibile utilizzazione come bioindicatori dell'inquinamento da metalli pesanti

Rodolfo Coccioni

Istituto di Geologia e Centro di Palinologia dell'Università, Campus Scientifico,  
Località Crocicchia, I-61029 Urbino

### Riassunto

Tra la primavera e l'autunno del 1997 è stata effettuata una dettagliata analisi delle associazioni a foraminiferi bentonici e della concentrazione di differenti metalli in tracce nella Sacca di Goro (Italia). Le biocenosi identificate sono caratterizzate da una ridotta diversità tassonomica e da un numero significativamente elevato di esemplari che sviluppano una varietà di anomalie morfologiche. Queste anomalie sembrano risultare dall'azione combinata di alcuni fattori quali l'arricchimento in Th e la riduzione di salinità. Questo studio conferma e avvalorata la possibilità di utilizzare i foraminiferi bentonici come tecnica per il monitoraggio continuo, *in situ*, dell'inquinamento da metalli in traccia.

### Introduzione

I foraminiferi sono comunemente utilizzati in differenti campi delle Scienze della Terra e delle Scienze Ambientali per una serie di motivi: 1) sono organismi capaci registrare nel loro guscio le fondamentali variazioni ambientali ed i processi evolutivi della storia della vita del nostro pianeta; 2) sono ampiamente distribuiti in tutti gli ambienti marini; 3) le loro ridotte dimensioni e la loro abbondanza consentono di ottenere associazioni statisticamente significative anche da campioni non particolarmente abbondanti; 4) hanno un'elevata diversità tassonomica; 5) hanno un ciclo vitale talmente breve (generalmente solo alcuni mesi) da consentire di valutare accuratamente le variazioni ambientali che si verificano in un ristretto intervallo di tempo.

I foraminiferi bentonici in particolare, vivendo in corrispondenza o appena al di sotto dell'interfaccia acqua-sedimento possono fornire utili informazioni sulle condizioni di fondo.

Negli ultimi decenni sono stati effettuati numerosi studi (Watkins, 1961; Lidz, 1965; Wright, 1968; Boltovskoy e Boltovskoy, 1968; tra gli altri) sulle associazioni a foraminiferi bentonici in differenti zone del mondo esposte a differenti tipi di inquinamento marino (vedi anche Alve, 1995, *cum bibl.*). Questi studi rappresentano un primo tentativo di sviluppare nuove metodologie per il monitoraggio biologico dei differenti tipi di contaminazione a mare e, contribuendo ad una migliore conoscenza della biologia dei foraminiferi (si veda Lee e Anderson, 1991), hanno dimostrato che i foraminiferi bentonici possono essere sensibili ed economici bioindicatori dell'inquinamento negli ambienti marini e di transizione.

Numerosi studi (Schafer et al., 1980; Naidu et al., 1985; Ellison et al., 1986; Alve, 1991; Sharifi et al., 1991; Banerji, 1992; Stubbles, 1993; Yanko et al., 1994, 1998; Ashraf, 1997; Coccioni et al., 1997) effettuati in differenti ambienti marini hanno analizzato la risposta dei foraminiferi bentonici all'inquinamento da metalli pesanti che si è notevolmente accresciuto negli ultimi decenni con effetti deleteri sugli ecosistemi. Queste ricerche hanno documentato che questo particolare tipo di in-

quinamento, favorendo probabilmente processi patologici a livello cellulare, svolge un ruolo molto importante nell'indurre una serie di fenomeni quali: sviluppo di gusci morfologicamente anormali, variazioni dell'abbondanza e della composizione tassonomica delle associazioni, variazioni delle dimensioni degli individui e modificazioni della struttura della parete del guscio. Di conseguenza, la maggior parte dei sopracitati autori ha suggerito di utilizzare la presenza di esemplari deformati di foraminiferi bentonici come potenziale bioindicatore, *in situ*, dell'inquinamento provocato da metalli pesanti; il tipo di deformazione del guscio potrebbe fornire addirittura informazioni relative al tipo di inquinante e sarebbe perfino possibile individuare un diverso grado di sensibilità dei taxa a questo particolare tipo di inquinamento.

Tuttavia, significative quantità di gusci anormali possono risultare anche dallo stress naturale dell'ambiente relativo sia a condizioni estreme (Zaninetti, 1982; Zampi e D'Onofrio, 1984, 1987; Almogi-Labin et al., 1992; tra gli altri) che a rapidissime variazioni dei parametri ecologici (Seiglie, 1964; Closs e Madeira, 1968; Caralp, 1989; tra gli altri).

Sulla base di un'accurata revisione dei dati esistenti in letteratura, Boltovskoy et al. (1991) hanno messo in evidenza che le variazioni morfologiche riscontrate nei foraminiferi bentonici possono essere messe in relazione a differenti parametri ambientali (temperatura, salinità, solubilità carbonatica, profondità, nutrienti, substrato, livelli di ossigeno disciolto, illuminazione, inquinamento, movimenti delle masse d'acqua, elementi in traccia e rapide variazioni ambientali). Questi Autori hanno concluso che le variazioni morfologiche dei gusci derivano più verosimilmente dalla variazione combinata di questi parametri.

Recentemente, sulla base di studi effettuati in laboratorio e negli ambienti naturali, Stouff et al. (1999) hanno dimostrato che lo sviluppo di anomalie morfologiche nei foraminiferi bentonici, e in particolare nel genere *Ammonia*, può derivare da una varietà di cause: alterazioni durante l'ontogenesi, ipersalinità (sebbene anomalie morfologiche simili si ritrovano sia in ambienti caratterizzati da valori variabili e/o estremi della salinità che in ambienti a salinità normale), schizogonia, decalcificazione e rigenerazione del guscio.

Allo stato attuale quindi, risulta difficile, spesso impossibile, separare la/e causa/e di uno stress ambientale antropico da quella/e di uno stress ambientale naturale ed individuare una singola causa specifica. È altrettanto difficile, spesso impossibile, separare gli effetti dell'inquinamento chimico da quelli degli elementi in traccia poiché tra gli inquinanti possono essere presenti molti di questi elementi. Inoltre, l'importanza di certi parametri è stata probabilmente sovrastimata poiché essi sono stati misurati molto più frequentemente di altri. Appare quindi necessario stabilire l'effettivo ruolo che i metalli pesanti hanno sulla distribuzione, sulla crescita e sullo sviluppo di morfologie anormali nei foraminiferi bentonici, prima di utilizzare questi organismi come bioindicatori dell'inquinamento da metalli pesanti.

Vengono qui presentati i risultati delle analisi condotte sui sedimenti superficiali della Sacca di Goro relativamente alle associazioni a foraminiferi bentonici ed alla concentrazione di elementi in traccia (Fig. 1).

La Sacca di Goro è particolarmente adatta per testare la risposta dei foraminiferi bentonici all'inquinamento da metalli pesanti poiché è stata oggetto di un programma pluriennale (1988-1991) per il monitoraggio dei principali parametri fisici, chimici e biologici (Bencivelli e Castaldi, 1991; Bencivelli et al., 1994). Nei suoi sedimenti, inoltre, si ritrovano numerosi esemplari morfologicamente anormali e significative concentrazioni di metalli pesanti.

### Area di studio

La Sacca di Goro è la laguna più meridionale del delta del fiume Po (Fig. 1). Con un'area totale di 26 km<sup>2</sup> ed una profondità media di 1.5 m, la sacca è la più importante fonte di reddito per la comunità locale che trova occupazione principalmente nella molluscocoltura. L'accresciuta frequenza ed intensità dell'inquinamento ambientale che ha interessato la sacca negli ultimi anni ha messo in



Figura 1 - Le stazioni di campionamento nella Sacca di Goro. Coordinate UTM: 1) 0288077, 4965804; 2) 0287807, 4966540; 3) 0288123, 4967016; 4) 0286848, 4967864; 5) 0285170, 4966480; 6) 0284866, 4966248; 7) 0291319, 4963352; 8) 0290938, 4965461; 9) 0285697, 4968975; 10) 0285367, 4967847; 11) 0286198, 4967555; 12) 0287765, 4967769; 13) 0287064, 4968601; 14) 0286875, 4966790; 15) 0286018, 4966098; 16) 0289165, 4965517.

anni, opere che hanno bloccato la sua evoluzione naturale (Colombo et al., 1991).

I sedimenti della sacca sono prevalentemente fangosi, fatta eccezione per l'area ubicata in prossimità della sua bocca dove sono presenti sedimenti essenzialmente sabbiosi (Dal Cin e Pambianchi, 1991).

I parametri chimico-fisici variano sensibilmente attraverso la sacca a causa dell'afflusso di acqua dolce dal Po di Volano e in considerazione dello scambio d'acqua con il Mar Adriatico. Nell'intervallo 1988-1991 (vedi Colombo et al., 1991 e 1994), i valori della temperatura e della salinità sono risultati rispettivamente compresi tra 5°C-27.1°C (mediamente 16.6°C) e 6.5‰-32.2‰ (mediamente 23.5‰) nelle acque superficiali e 4.2°C -27.5°C (mediamente 16.6°C) e 11.7‰-31‰ (mediamente 26.9‰) nelle acque di fondo. Non si sono riscontrate significative variazioni dei valori medi della temperatura entro la sacca (vedi Colombo et al., 1991 e 1994). I valori più bassi della salinità, sia delle acque superficiali che di quelle di fondo, caratterizzano la parte orientale (valori medi rispettivamente di 21.7‰ e 24.2‰) e quella occidentale (valori medi rispettivamente di 20.7‰ e 26.1‰) della sacca. I valori più elevati di questi parametri (rispettivamente 26% e 28.4‰ in media) caratterizzano le zone prossime alla sua bocca. Sulla base dei valori di salinità riscontrati, la Sacca di Goro può essere considerata un corpo d'acqua polialino. Relativamente al pH sono stati misurati valori compresi tra 7.3 e 9.1 nelle acque superficiali e tra 7.4 e 9 nelle acque di fondo. La concentrazione di ossigeno nelle acque di fondo si è mantenuta generalmente al di sopra del livello critico, con valori compresi tra 3.7 mg/l e 12.4 mg/l.

Negli ultimi anni, tuttavia, per effetto dell'aumentato carico di sostanze solide e liquide dall'entroterra attraverso il Po di Volano (Fig.1) che drena aree fortemente industrializzate per una superficie totale di circa 3000 km<sup>2</sup>, nella Sacca di Goro si sono manifestate gravi crisi distrofiche con anossia sia a livello dei sedimenti sia delle masse d'acqua, con ripercussioni negative sulle risorse biologiche sfruttate e sulle attività economiche ad esse correlate (vedi Bencivelli e Castaldi, 1991; Bencivelli et al., 1994; Vollenweider et al., 1992).

La Sacca di Goro può essere considerata attualmente come un corpo d'acqua eutrofico, da moderatamente a fortemente inquinato (Fagioli et al., 1991, 1994; Barbanti et al., 1992; Pugnetti et al., 1992; Rinaldi et al., 1992; Pambianchi et al., 1994).

crisi il suo ecosistema e, conseguentemente, anche l'attività economica ad essa connessa (Bencivelli e Castaldi, 1991; Bencivelli et al., 1994; Vollenweider et al., 1992).

La Sacca di Goro si è formata durante gli ultimi due secoli in seguito al protendersi verso mare del ramo deltizio meridionale, il Po di Goro, con i suoi apporti solidi rimaneggiati e ridistribuiti dalle correnti marine costiere. Dall'inizio di questo secolo la sacca ha cominciato a assumere una configurazione più precisa e dal 1960 ha assunto la topografia attuale (Ciabatti, 1967). La Sacca di Goro si è conservata in seguito a numerosi interventi di consolidamento degli scanni e di arginature effettuati in questi ultimi

## Materiali e metodi

Questo studio è basato su 47 campioni superficiali prelevati, per mezzo di una benna di tipo Hakmann, in sedici stazioni selezionate entro la Sacca di Goro (Fig. 1). Due sets di campioni (30 g di sedimento secco per campione) sono stati prelevati in ciascuna stazione nel corso di tre diversi campionamenti effettuati nell'arco di un periodo di sei mesi, un ragionevole intervallo di tempo per ottenere valide informazioni sulle associazioni a foraminiferi, sulla concentrazione degli elementi in traccia e sul contenuto in carbonio organico totale.

I tre campionamenti sono stati effettuati rispettivamente nella primavera (aprile), nell'estate (luglio) e nell'autunno (ottobre) del 1997. A causa di sfavorevoli condizioni meteorologiche, in primavera non è stato possibile campionare una delle stazioni.

Seguendo il metodo descritto da Walton (1952), il primo set di campioni, immediatamente dopo il prelevamento, è stato trattato con una soluzione tampone di Rosa Bengala in modo da differenziare gli esemplari vivi, colorati, da quelli morti, non colorati. In questo lavoro è stato seguito il metodo proposto da De Stigter et al. (1998) per distinguere correttamente gli esemplari vivi. Nonostante i suoi limiti (vedi Boltovskoy e Wright, 1976; Walker et al., 1974; Gooday, 1986; Bernhard, 1988; Jorissen et al., 1995), il metodo del Rosa Bengala rimane il metodo più pratico e corretto (vedi anche Lutze e Altenbach, 1991) per analizzare le biocenosi.

I campioni del primo set sono stati lavati attraverso setacci da 63 e 125  $\mu\text{m}$  e successivamente asciugati. Almeno 300 esemplari sono stati separati dalla frazione maggiore di 125  $\mu\text{m}$  e contati per l'analisi faunistica, distinguendo gli individui vivi da quelli morti e gli individui normali da quelli morfologicamente anormali.

La correlazione tra la percentuale di esemplari anormali e la concentrazione dei metalli pesanti è stata effettuata, comunque, prendendo in considerazione gli esemplari presenti. Tra i parametri faunistici è stata presa in considerazione anche la densità faunistica della frazione maggiore di 125  $\mu\text{m}$ , espressa come il numero di esemplari vivi per g di sedimento secco.

Le anomalie morfologiche riconosciute sono state fotografate al microscopio elettronico a scansione e riprodotte nelle tavole 1 e 2. Il materiale utilizzato per questo studio è conservato presso l'Istituto di Geologia dell'Università di Urbino.

L'identificazione dei foraminiferi è stata effettuata seguendo la classificazione proposta da Loeblich e Tappan (1988). Inoltre, in accordo con Poag (1978) e Jorissen (1988), alcune specie (*Ammonia beccarii*, *Ammonia parkinsoniana*, *Ammonia tepida*, *Cibicides decipiens*, e *Haynesina lidoensis*) sono state considerate come forme e tre morfotipi sono stati assegnati ad *A. parkinsoniana* forma *tepida* (vedi appendice).

Seguendo metodi standard di laboratorio (Franzini et al., 1972, 1975; Leoni e Saitta, 1976; Leoni et al., 1982) ed utilizzando uno spettrometro Philips PW 1480, in alcuni campioni appartenenti al secondo set sono state determinate le concentrazioni (in ppm) di diciannove elementi in traccia (Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Nb, Pb, Hg, Ga, Sr, Ba, Y, Zr, Rb, La, Ce, Th) e di tre altri inquinanti (S, As, Br). Sugli stessi campioni è stato anche determinato il contenuto in carbonio organico totale (COT, espresso come % in peso) utilizzando il metodo di combustione LECO (Leco Industrial Furnace).

Nella valutazione di possibili relazioni tra il numero ed il tipo di esemplari vivi anormali e la concentrazione degli elementi in traccia, sono stati presi in considerazione tutti gli elementi sopracitati che complessivamente includono metalli pesanti s.s., non-metalli, metalli terre-rare e un metallo attinide. Nel presente studio, al fine di poter confrontare i risultati con quelli emersi dagli studi precedenti e di esporre nuovi dati, sono valutate solamente le concentrazioni di nove elementi in traccia (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Hg, Pb, Th).

## Risultati e discussione

### Analisi dei foraminiferi

#### Struttura e composizione

Nei sedimenti superficiali della Sacca di Goro sono state identificate 97 specie (95 calcaree e 2 agglutinanti, incluse 5 *formae* e 3 morfotipi) di foraminiferi bentonici, appartenenti a 50 generi. Le maggior parte delle specie identificate è presente nelle associazioni con percentuali modestissime e con esemplari morti che sono qui considerati come trasportati e ridepositati nella sacca.

La percentuale di esemplari vivi è compresa tra 0 (stazioni 1 e 5, aprile 1997; stazione 1, luglio 1997) e 21% (stazione 4, luglio 1997)

Sono stati riconosciuti come vivi solamente gli esemplari riferibili ad 8 specie (incluse 2 *formae* e 3 morfotipi) (Fig. 2). Le biocenosi sono dominate da *A. parkinsoniana* forma *tepida* mf. 2 (34-38%), *Haynesina germanica* (33-35%), *Criboelphidium gunteri* (11-16%) e, subordinatamente, da *A. parkinsoniana* forma *tepida* mf. 3 (4-11%) e *Quinqueloculina seminulum* (3-5%) che nel loro insieme costituiscono il 98% delle associazioni. *A. parkinsoniana* forma *parkinsoniana*, *A. parkinsoniana* forma *tepida* mf. 1, *Trochammina inflata*, *Ammonia perlucida*, *Cassidulina laevigata carinata* e *Elphidium advenum* sono presenti nelle biocenosi con percentuali molto ridotte.

Le associazioni a foraminiferi bentonici della Sacca di Goro sono caratterizzate da ridottissima diversità tassonomica e sono composte da specie che hanno differenti strategie di vita ed appartengono a morfogruppi diversi. Queste associazioni sono ben confrontabili con le associazioni ad *Ammonia beccarii* delle zone lagunari mediterranee (vedi Murray, 1991). La dominanza di *A. parkinsoniana* forma *tepida* nelle biocenosi deriva dalla sua singolare adattabilità per gli ambienti ipotalini ed inquinati mentre le elevate percentuali dei suoi morfotipi 2 e 3 sono relative alla loro tolleranza verso gli ambienti scarsamente ossigenati (Jorissen, 1988).

Gli individui riferibili ad *A. parkinsoniana* forma *tepida* sono per la maggior parte megalosferici, confermando le condizioni di stress della sacca. Infatti, gli individui megalosferici si originano durante il ciclo aseasonato che secondo Furssenko (1978) avviene preferibilmente sotto condizioni di stress. La presenza di numerosi individui megalosferici di *A. beccarii* (corrispondenti alle forme qui determinate come *A. parkinsoniana* forma *tepida*) è stata riscontrata da Zampi e D'Onofrio (1984, 1987) nelle Lagune di S. Gilla (Sardegna) e di Orbetello (Toscana) e messa in relazione, dagli stessi autori, con

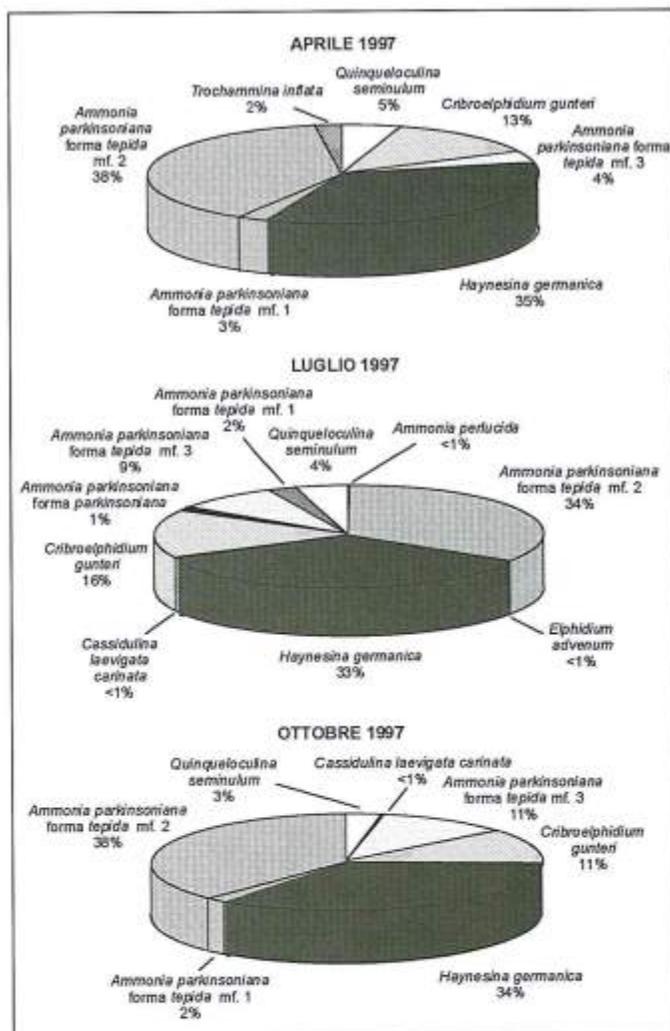


Figura 2 - Percentuali medie dei diversi taxa (specie, *formae* e morfotipi) che costituiscono le biocenosi a foraminiferi bentonici della Sacca di Goro.

l'alterazione antropica di parametri chimico-fisici come l'ossigeno disciolto e il pH. Infine, abbondanti esemplari megalosferici di *A. tepida* sono stati rinvenuti da Yanko et al. (1994) lungo le coste israeliane, in un'area soggetta ad inquinamento da metalli tossici.

La diversità tassonomica delle biocenosi è relativamente più elevata in luglio, quando, in accordo con Rinaldi et al. (1992), il flusso di nutrienti è più abbondante. La densità faunistica varia da 0 (stazioni 1 e 6, campionamento primaverile) a 96 (stazione 6, campionamento autunnale); i valori sono generalmente più elevati nelle stazioni dove i sedimenti sono prevalentemente fangosi suggerendo una stretta correlazione tra la densità faunistica ed il tipo di substrato (Figg. 3 e 4).

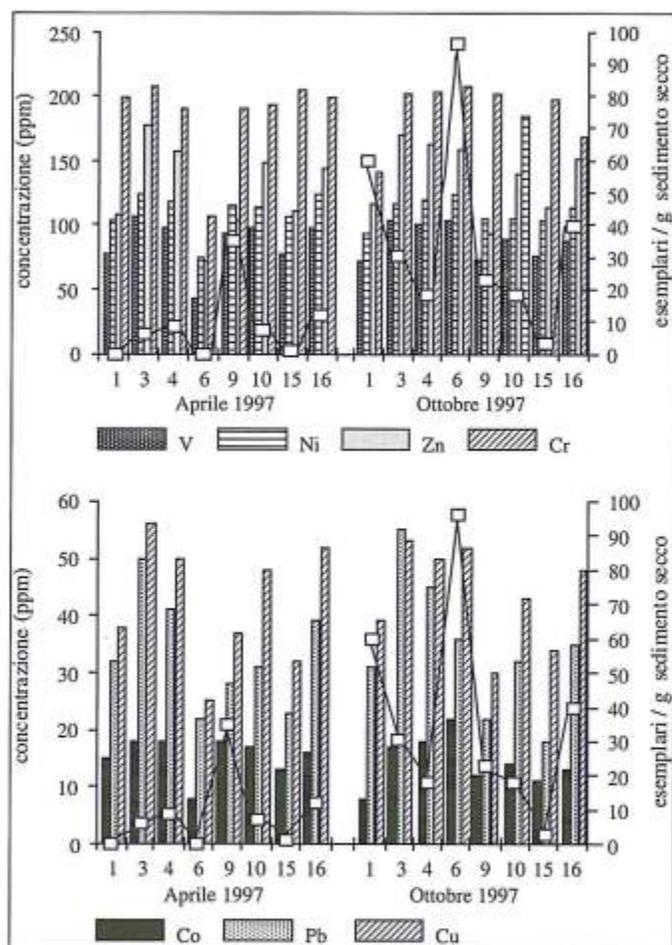


Figura 3 - Confronto tra le concentrazioni di V, Ni, Zn, Cr, Co, Pb e Cu e le densità faunistiche delle biocenosi nelle stazioni selezionate durante il campionamento primaverile (aprile 1997) e quello autunnale (ottobre 1997) nella Sacca di Goro.

interessati da anomalie morfologiche che si sviluppano indipendentemente dalle loro affinità tassonomiche, dalle loro strategie di vita e dalla loro morfologia.

Le biocenosi anormali sono dominate, in ordine decrescente di abbondanza, da *A. parkinsoniana* forma *tepida* mf. 2, *H. germanica*, *C. gunteri* e *A. parkinsoniana* forma *tepida* mf. 3, sebbene marcate va-

#### Anomalie morfologiche

Lo sviluppo di anomalie morfologiche nel guscio dei foraminiferi è una caratteristica piuttosto comune nella Sacca di Goro (Tavv. 1 e 2.). Esso è senz'altro attribuibile a morfogenesi patologica piuttosto che a danneggiamento meccanico.

Le anomalie morfologiche sono state osservate in tutte le stazioni per l'intero intervallo di tempo considerato. La percentuale di esemplari deformati, tuttavia, varia da stazione a stazione, raggiungendo il suo massimo valore (37%) nella stazione 15, campionamento autunnale. I valori medi di questa percentuale variano leggermente (9-17%) nell'intervallo di tempo considerato. La percentuale di individui anormali risulta generalmente più elevata nelle stazioni ubicate in prossimità dei margini occidentale ed orientale della sacca dove, in accordo con Colombo et al. (1991, 1994), i valori della salinità sono più ridotti. Ciò indicherebbe l'esistenza di una correlazione negativa tra il numero di esemplari deformati e i valori della salinità. Va qui segnalato che un analogo aumento del numero di esemplari deformati in aree inquinate ed a salinità ridotta è stato riscontrato da Yanko et al. (1998) lungo le coste israeliane.

Nell'ambito delle biocenosi, 7 taxa (*A. parkinsoniana* forma *tepida* mf. 1, *A. parkinsoniana* forma *tepida* mf. 2, *A. parkinsoniana* forma *tepida* mf. 3, *C. laevigata carinata*, *C. gunteri*, *H. germanica* e *Q. seminulum*) (Fig. 5) sono

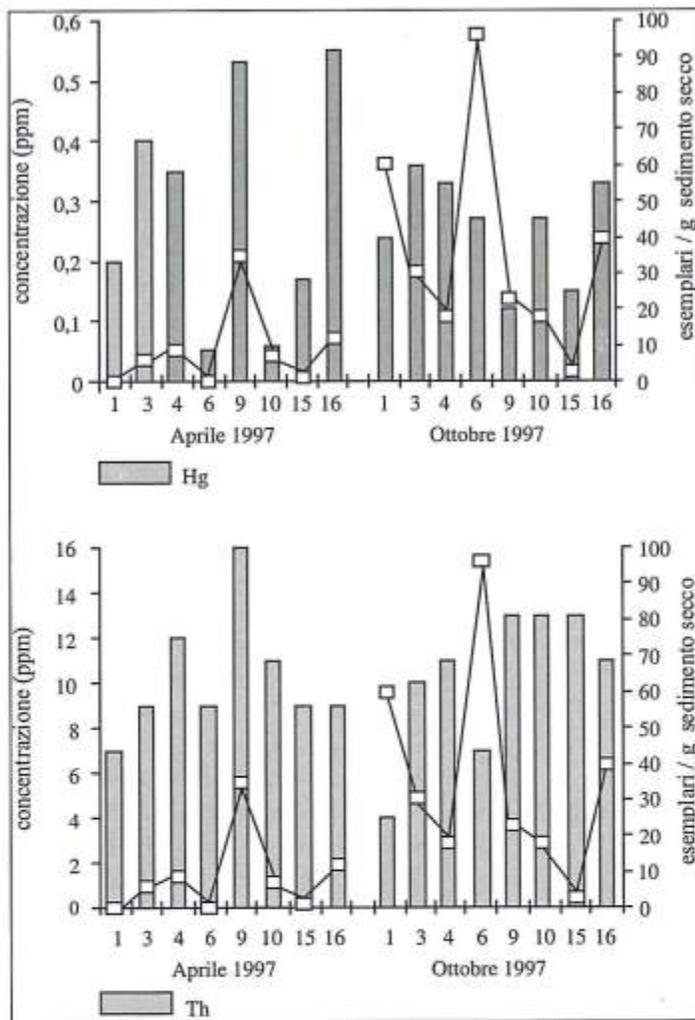


Figura 4 - Confronto tra le concentrazioni di Hg e Th e le densità faunistiche delle biocenosi nelle stazioni selezionate durante il campionamento primaverile (aprile 1997) e quello autunnale (ottobre 1997) nella Sacca di Goro.

riazioni della loro abbondanza siano state osservate nell'intervallo di tempo considerato. L'ordine decrescente di abbondanza dei suddetti taxa appare riflettere il loro grado di sensibilità alla variazione morfologica.

Anche sulla base di lavori precedenti (Alve, 1991; Sharifi et al., 1991; Almog-Labin et al., 1992; Yanko et al., 1994, 1998) e considerando la porzione di guscio coinvolta e il tipo di variazione morfologica sono state riconosciute 7 differenti tipi di anomalie morfologiche: 1) riduzione delle dimensioni di una o più camere, 2) presenza di una o più camere di forma aberrante; 3) disposizione distorta delle camere e/o variazione della direzione di avvolgimento, 4) presenza di una o più camere aggiuntive anormali, 5) presenza di una o più camere sporgenti, 6) "fratelli siamesi", 7) sviluppo incompleto del guscio (Tab. 1 e Tavv. 1-2). Le anomalie morfologiche più comuni sono quelle riferibili ai primi tre tipi, sebbene in uno stesso esemplare possono coesistere diversi tipi di anomalie. La variazione morfologica può provocare occasionalmente una deformazione del guscio così intensa da rendere impossibile non solo l'individuazione della parte di guscio coinvolta nel processo ma perfino la determinazione tassonomica.

Specie/formae/morfotipi	1	2	3	4	5	6	7
<i>Ammonia parkinsoniana</i> forma <i>tepida</i> mf. 1	■	■	■				
<i>Ammonia parkinsoniana</i> forma <i>tepida</i> mf. 2	■	■	■	■	■	■	■
<i>Ammonia parkinsoniana</i> forma <i>tepida</i> mf. 3	■	■	■	■	■	■	■
<i>Cassidulina laevigata carinata</i>	■	■					
<i>Cribolephidium gutteri</i>	■	■	■	■	■	■	■
<i>Haynesina germanica</i>	■	■	■	■		■	■

Tabella 1 - Percentuali dei taxa rinvenuti nella Sacca di Goro nelle diverse stazioni del campionamento estivo (luglio 1997): T, esemplari complessivamente presenti nella biocenosi e nella tanatocenosi; TD, esemplari anormali complessivamente presenti nella biocenosi e nella tanatocenosi; L, esemplari presenti nella biocenosi; LD, esemplari anormali presenti nella biocenosi.

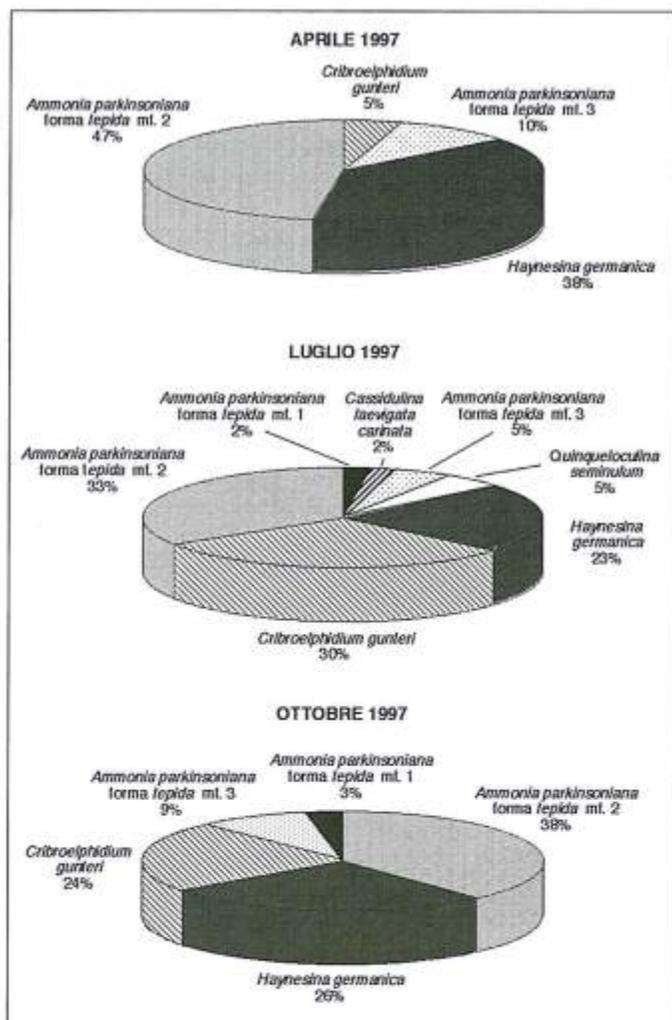


Figura 5 - Percentuali medie dei diversi taxa (specie, *formae* e morfotipi) che costituiscono le biocenosi morfologicamente anormali della Sacca di Goro.

do, da un lato, e lo sviluppo di morfologie anormali, la concentrazione di elementi in traccia ed il contenuto in materiale organico, dall'altro.

In tutte le stazioni, le concentrazioni di Cr e Ni sono più elevate di quelle misurate nelle peliti non inquinate delle aree circostanti della piana alluvionale (vedi Fagioli et al. 1991, 1994). I sedimenti risultano moderatamente arricchiti in Cu e Zn; occasionalmente si rilevano anche concentrazioni più elevate di Pb.

Sulla base dei valori di riferimento forniti per alcuni elementi dall'Environmental Protection Agency (EPA) (vedi Prater e Anderson, 1977) e tenendo in considerazione anche le concentrazioni degli elementi in tracce fornite da Fagioli et al. (1991, 1994), si può affermare che la Sacca di Goro, relativamente all'ultimo decennio ed almeno per quanto riguarda Cr, Ni, Cu, Zn e Pb, costituisce un corpo d'acqua da moderatamente a fortemente inquinato.

Nessuna evidente relazione è stata individuata tra la percentuale di esemplari anormali nelle biocenosi e le concentrazioni di V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Hg e Pb (Fig. 7). Al contrario, sebbene non siano particolarmente elevate (4-16 ppm, con un valore medio di 10 ppm), le concentrazioni del Th risultano positivamente correlabili con le percentuali di esemplari anormali nelle biocenosi (Fig. 8).

## Geochemica dei sedimenti

La concentrazione degli elementi in traccia e il contenuto in COT misurati in primavera e in autunno variano da stazione a stazione (Tab. 2).

Comunque, la proporzione relativa dei differenti elementi in traccia è simile in tutte le stazioni suggerendo per la Sacca di Goro la stessa fonte (o le stesse fonti) di inquinamento nell'intervallo di tempo considerato.

Come noto, la distribuzione e la concentrazione degli elementi in traccia in ambiente acquatico dipende da diversi fattori (composizione chimica, dimensione del materiale particolato, attività biologica sul fondo marino, ecc.) ed è fortemente influenzata da alcuni parametri chimico-fisici (salinità, temperatura, Eh, pH, ecc.) che controllano la loro stabilità. Nel presente studio, comunque, nessuna relazione è stata individuata tra la concentrazione dei metalli pesanti ed i valori dei parametri chimico-fisici presentati da Colombo et al. (1991, 1994) né tra la densità faunistica delle biocenosi e la concentrazione degli elementi in traccia e il contenuto in COT (Figg. 4-6).

Sulla base di queste osservazioni sembra ragionevole sostenere che nella Sacca di Goro non esiste nessuna relazione tra la vita dei foraminiferi bentonici nei sedimenti di fon-

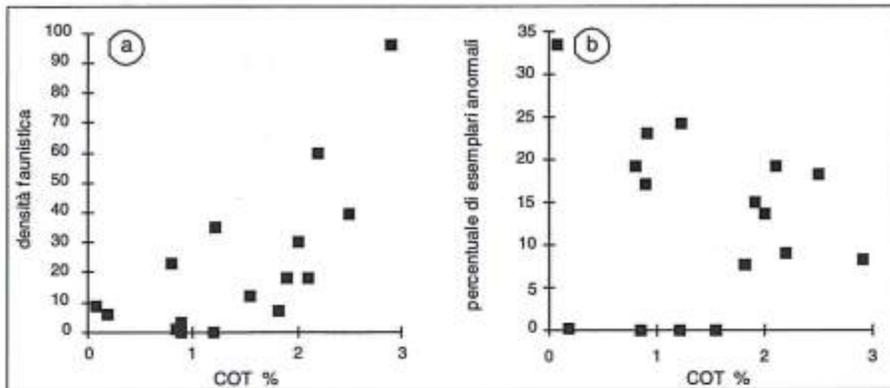


Figura 6 - Confronto tra il COT % e le densità faunistiche (frazione > 125 µm) delle biocenosi (a) e le percentuali di esemplari anormali nelle biocenosi (b) nelle stazioni selezionate durante il campionamento primaverile (aprile 1997) e quello autunnale (ottobre 1997) nella Sacca di Goro.

Tabella 2 - Concentrazioni dei più significativi metalli in traccia e contenuti del carbonio organico totale (COT) nei sedimenti delle stazioni selezionate nel campionamento primaverile (aprile 1997) ed in quello autunnale (ottobre 1997) messi a confronto con i valori di riferimento forniti dall'Environmental Protection Agency (EPA). SLR = valore inferiore al limite di rilevamento.

APRILE 1997

Stazione	V ppm	Cr ppm	Co ppm	Ni ppm	Cu ppm	Zn ppm	Hg ppm	Pb ppm	Th ppm	COT %
1	77	199	15	104	38	108	0.2	32	7	1.21
3	106	208	18	123	56	177	0.4	50	9	0.18
4	98	190	18	118	50	157	0.35	41	12	0.07
6	43	106	8	75	25	72	0.053	22	9	0.89
9	93	190	18	115	37	104	0.53	28	16	1.22
10	97	193	17	113	48	148	0.06	31	11	1.82
15	76	205	13	107	32	111	0.17	23	9	0.85
16	97	199	16	124	52	144	0.55	39	9	1.55

OTTOBRE 1997

Stazione	V ppm	Cr ppm	Co ppm	Ni ppm	Cu ppm	Zn ppm	Hg ppm	Pb ppm	Th ppm	COT %
1	72	141	8	94	39	117	0.24	31	4	2.20
3	103	202	17	116	53	170	0.36	55	10	2.00
4	100	203	18	120	50	162	0.33	45	11	2.10
6	103	207	22	123	52	159	SLR	36	7	2.90
9	73	202	12	105	30	94	0.12	22	13	0.80
10	89	185	14	105	43	139	0.27	32	13	1.90
15	76	198	11	104	34	114	0.15	18	13	0.90
16	87	169	13	113	48	151	0.33	35	11	2.50

Elemento	Non inquinato	Moderatamente inquinato	Molto inquinato
Cr	< 25	25-75	>75
Ni	< 20	20-50	> 50
Cu	< 25	25-50	> 50
Zn	< 90	90-200	> 200
Cd	-	-	> 6
Hg	< 1	-	> 1
Pb	< 40	40-60	> 60

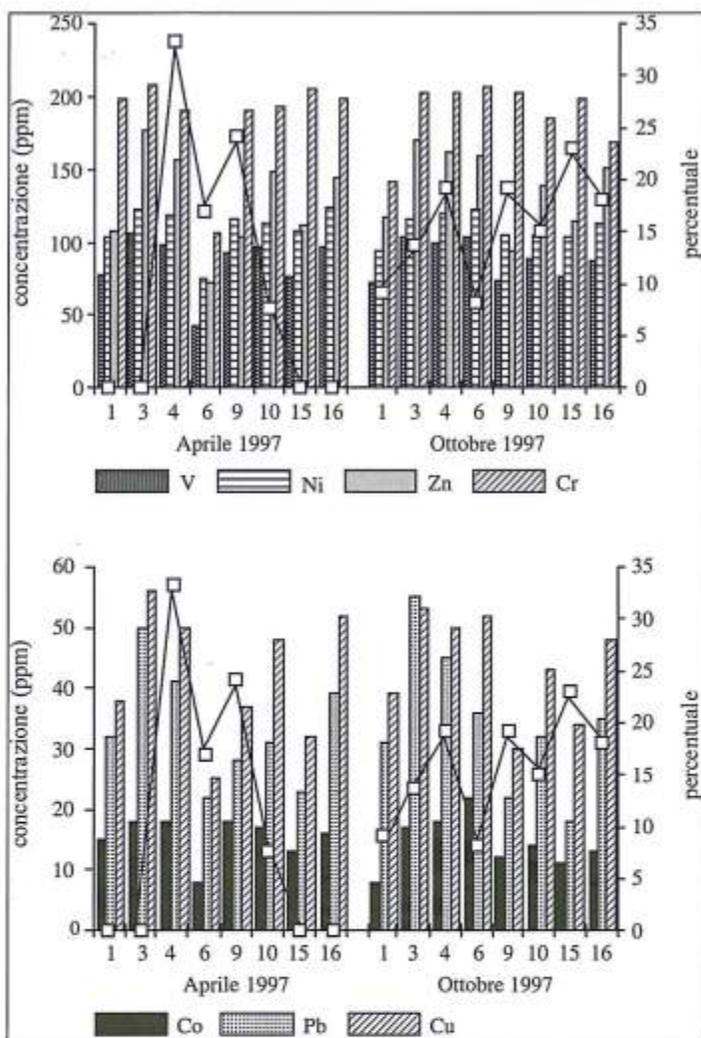


Figura 7 - Confronto tra le concentrazioni di V, Ni, Zn, Cr, Co, Pb e Cu e le percentuali di esemplari anormali nelle biocenosi nelle stazioni selezionate durante il campionamento primaverile (aprile 1997) e quello autunnale (ottobre 1997).

### Conclusioni

1. Le biocenosi a foraminiferi bentonici della Sacca di Goro sono caratterizzate da una bassissima diversità tassonomica e da un significativo numero di esemplari che sviluppano una varietà di anomalie morfologiche.
2. Il numero di esemplari anormali è più elevato nelle aree a salinità inferiore.
3. L'aumento delle concentrazioni di Cr, Ni, Cu, Zn e Pb nei sedimenti non ha un marcato effetto sulla distribuzione dei foraminiferi e sullo sviluppo delle anomalie morfologiche.
4. È stata individuata una correlazione positiva tra la concentrazione di Th e la percentuale di esemplari anormali; pertanto questo elemento potrebbe avere un ruolo importante nello sviluppo di anomalie morfologiche. Evidentemente sono necessari ulteriori studi su un intervallo di tempo più lungo e su un'area più ampia per comprendere meglio questo tipo di correlazione.
5. Differenti specie di foraminiferi bentonici mostrano una diversa propensione allo sviluppo di anomalie morfologiche.

Questo risultato non è sorprendente se si considera che il Th, nonostante la sua radioattività, non è particolarmente rischioso negli ambienti naturali ma diviene particolarmente pericoloso quando colpisce i componenti scheletrici (Bowie e Plant, 1983). Purtroppo, i meccanismi che controllano la distribuzione e la concentrazione di questo elemento nella Sacca di Goro non sono ancora noti. Nella vicina Laguna di Venezia, secondo Albani et al. (1995), il Th (concentrazione media di 5.6 ppm), al pari di altri elementi come Mn, P, V, Ga, Rb e Nb, proverrebbe principalmente dai suoli agricoli dell'entroterra sebbene non si possano escludere addizionali immissioni locali.

Come noto, il Th è un metallo attinide utilizzato attualmente soprattutto per applicazioni nucleari ed elettroniche. Non si può escludere comunque che le elevate concentrazioni riscontrate negli ultimi anni (fino a 119 ppm durante l'estate 1996, dati inediti) potrebbero in qualche modo essere messe in relazione con la redistribuzione, diretta e/o indiretta, dei prodotti di "fall-out" susseguenti alle recenti esplosioni nucleari includendo tra queste anche l'incidente del reattore nucleare di Chernobyl avvenuto il 26 aprile 1986.

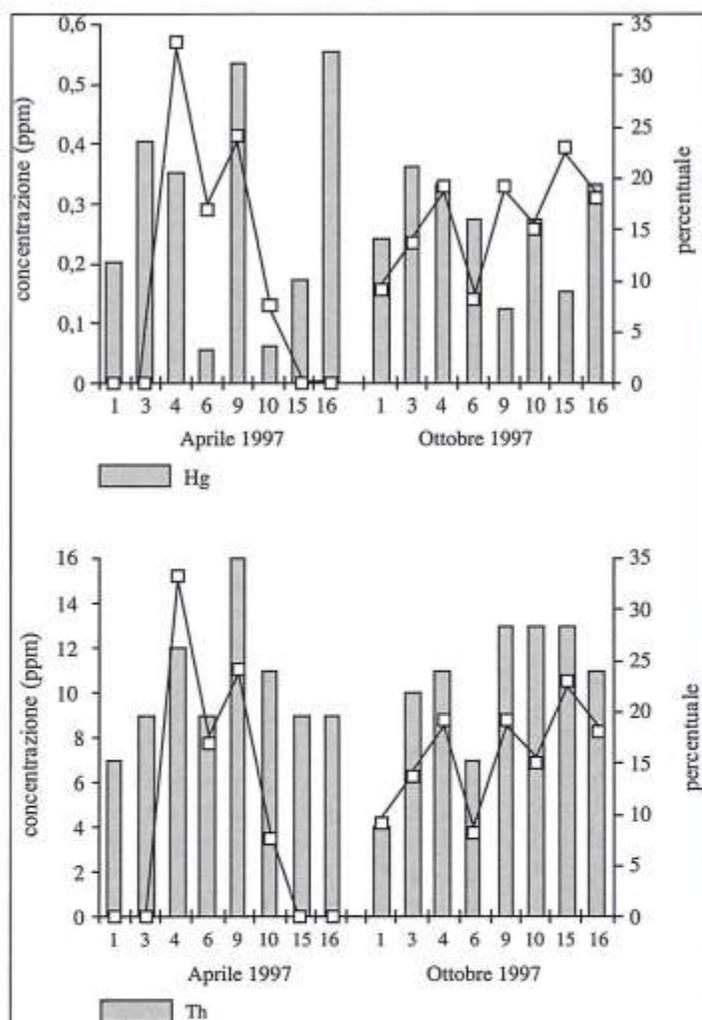


Figura 8 - Confronto tra le concentrazioni di Hg e Th e le percentuali di esemplari anomali nelle biocenosi nelle stazioni selezionate durante il campionamento primaverile (aprile 1997) e quello autunnale (ottobre 1997).

6. La presenza di individui anomali nella Sacca di Goro, anche in accordo con studi precedenti, può essere attribuita a stress ambientale risultante da inquinamento antropico da metalli in traccia e/o da effetti naturali (estreme condizioni e/o rapide variazioni dei parametri ecologici).

7. Le anomalie morfologiche osservate nell'intervallo di tempo considerato nella Sacca di Goro derivano più probabilmente da una combinazione di fattori ed è improbabile, allo stato attuale, individuare una causa specifica.

8. Esperimenti di laboratorio associati allo studio dei meccanismi biochimici e cristallografici coinvolti nello sviluppo di anomalie morfologiche sono indispensabili per meglio comprendere la reazione morfologica dei foraminiferi bentonici ai diversi livelli e tipi di inquinamento.

9. Questo studio, comunque, conferma e rafforza la possibilità di utilizzare i foraminiferi bentonici come tecnica per il monitoraggio continuo, *in situ*, dell'inquinamento da metalli in traccia.

#### Ringraziamenti

Si ringraziano J. Pignatti e G. Valleri per la revisione critica del manoscritto. Questo studio è stato effettuato con fondi MURST 60% (resp. R. Coccioni).

#### Bibliografia

- Albani A.D., Rickwood P.C., Favero V.M. e Barbero R.S. (1995) - *The geochemistry of recent sediments in the Lagoon of Venice: Environmental implications*. Atti Istituto Veneto Scienze, Lettere ed Arti, 153:235-321.
- Almogi-Labin A., Perelis-Grossovicz L. e Raab M. (1992) - *Living Ammonia from a hypersaline inland pool, Dead Sea area, Israel*. Journal of Foraminiferal Research, 22, 257-266.
- Alve E. (1991) - *Benthic foraminifera in sediment cores reflecting heavy metal pollution in Sørjford, Western Norway*. Journal of Foraminiferal Research, 21, 1-19.
- Alve E. (1995) - *Benthic foraminifera response to estuarine pollution: a review*. Journal of Foraminiferal Research, 25, 190-203.

- Ashraf M.S. (1997) - *Thanatocoenotic foraminiferal assemblage and impact of heavy metals Pollution on Ammonia beccarii (s.l.), Manzalab Lagoon, Egypt*. Abstract Volume EUG 9, Strasbourg, France, 23-27 March 1997, p. 663.
- Banerji R.K. (1992) - *Heavy Metals and Benthic Foraminiferal Distribution along Bombay Coast, India*. In: *Studies in Benthic Foraminifera* (Y. Takayanagi & T. Saito, eds.), pp. 151-157, Tokai University Press, Tokyo.
- Barbanti A., Ceccherelli V.U., Frascari F., Rosso G. e Reggiani G. (1992) - *Nutrient release from sediments and the role of bioturbation in the Goro Lagoon (Italy)*. In: *Marine Coastal Eutrophication*, (R.A. Vollenweider, R. Marchetti and R. Viviani, eds.), pp. 475-487, Elsevier, Amsterdam.
- Bencivelli S. e Castaldi N. (a cura di) (1991) - *Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo, 1° anno di ricerche*. Franco Angeli s.r.l., Milano, 263 pp.
- Bencivelli S., Castaldi N. e Finessi D. (a cura di) (1994) - *Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo, 2° anno di ricerche*. Franco Angeli s.r.l., Milano, 303 pp.
- Bernhard J. M. (1988) - *Postmortem vital staining in benthic foraminifera: duration and importance in population and distributional studies*. *Journal of Foraminiferal Research*, 18, 143-146.
- Boltovskoy E. e Boltovskoy A. (1968) - *Foraminiferos y tecamebas de la parte inferior del Rio Quequén Grande (sistemática, distribución, ecología)*. Museo Argentino de Ciencias Naturales, *Revista de Hidrobiología*, 2(4), 127-164.
- Boltovskoy E. e Wright R. (1976) - *Recent foraminifera*. Dr. W. Junk, The Hague.
- Boltovskoy E., Scott D.B. e Medioli F.S. (1991) - *Morphological variations of benthic foraminiferal tests in response to changes in ecological parameters: a review*. *Journal of Paleontology*, 65, 175-185.
- Bowie S.H.U. e Plant J.A. (1983) - *Natural Radioactivity in the Environments*. In: *Applied Environmental Geochemistry*, (I. Thornton, ed), pp. 481-494, Academic Press, London.
- Caralp M.H. (1989) - *Size and morphology of the benthic foraminifer *Melonis barleeanum*: Relationship with marine organic matter*. *Journal of Foraminiferal Research*, 19, 235-245.
- Ciabatti M. (1967) - *Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano*. *Giorn. Geol.*, 34, 1-26.
- Closs D. e Madeira M.L. (1968) - *Seasonal variations of brackish foraminifera in the Patos Lagoon, southern Brazil*. *Universidade do Rio Grande do Sul, Escola de Geologia, Publicação especial* 15, 1-51.
- Coccioni R., Gabbianelli G., Gentiloni Silverj D., Fonti P., Kaminski M.A., Monechi S. e Tateo F. (1997) - *Benthic foraminiferal to heavy metal pollution in the Goro Lagoon (Italy)*. The First International Conference "Application of Micropaleontology in Environmental Sciences", Tel Aviv, June 15-20, 1997, 47-48.
- Colombo G., Camerota C., Bisceglia R., Zaccaria V., Gaiani V. e Carrieri A. (1991) - *Variazioni spaziali e temporali delle caratteristiche fisico-chimiche delle acque e della biomassa fitoplanctonica della Sacca di Goro*. In: *Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo, 1° anno di ricerche*, (S. Bencivelli e N. Castaldi, a cura di), pp. 9-38, Franco Angeli s.r.l., Milano.
- Colombo G., Bisceglia R., Zaccaria V. e Gaiani, V. (1994) - *Variazioni spaziali e temporali delle caratteristiche fisico-chimiche delle acque e della biomassa fitoplanctonica della Sacca di Goro nel quadriennio 1988-1991*. In: *Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo, 2° anno di ricerche*, (S. Bencivelli, N. Castaldi e D. Finessi, a cura di), pp. 9-82, Franco Angeli s.r.l., Milano.
- Dal Cin R. e Pambianchi P. (1991) - *I sedimenti della Sacca di Goro (Delta del Po)*. In: *Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo, 1° anno di ricerche*, (S. Bencivelli e N. Castaldi, a cura di), pp.253-263, Franco Angeli s.r.l., Milano.
- De Stigter H.C., Jorissen F.J. e Van der Zwaan G.J. (1998) - *Bathymetric distribution and microhabitat partitioning of live (Rose Bengal stained) benthic foraminifera along a shelf to bathyal transect in the southern*

- Adriatic Sea*. Journal of Foraminiferal Research, 21, 40-65.
- Ellison R. L., Broome R. e Ogilvie R. (1986) - *Foraminiferal Response to Trace Metal Contamination in the Patuxco River and Baltimore Harbour, Maryland*. Marine Pollution Bulletin, 17(9), 419-423.
- Fagioli F., Landi S., Locatelli C. e Vecchiotti R. (1991) - *Valutazione del carico di metalli nelle acque, nei sedimenti e nei principali organismi accumulatori*. In: Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo, 1° anno di ricerche, (S. Bencivelli e N. Castaldi, a cura di), pp. 135-172, Franco Angeli s.r.l., Milano.
- Fagioli F., Righini F., Landi S. e Locatelli S. (1994) - *Valutazione del carico di metalli nelle acque, nei sedimenti e nei principali organismi accumulatori*. In: Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo, 2° anno di ricerche (S. Bencivelli, N. Castaldi e Finessi, D., a cura di), pp. 177-226, Franco Angeli s.r.l., Milano.
- Franzini M., Leoni L. e Saitta M. (1972) - *Revisione di una metodologia analitica per fluorescenza-X basata sulla correzione completa degli effetti di matrice*. Rend. Soc. It. Min. Petrol., 31, 365-378.
- Franzini M., Leoni L. e Saitta M. (1975) - *A simple method to evaluate the matrix effects in X-ray analysis*. X-Ray Spectrom., 1, 151-154.
- Furssenko A.V. (1978) - *Vvedenie v izuchenie foraminifer (Introduction to study of Foraminifera)*. (V.I. Gudina, ed.), 242 p., Nauka, Novosibirsk.
- Gooday A., J. (1986) - *Meiofaunal foraminifera from the bathyal Porcupine Seabight (northeast Atlantic) size structure, standing crop, taxonomic composition, species diversity and vertical distribution in the sediment*. Deep-Sea Research, 33, 1345-1373.
- Jorissen F.J. (1988) - *Benthic foraminifera from the Adriatic Sea: principles of phenotypic variation*. Utrecht Micropal. Bull., 37, 1-176.
- Jorissen F.J., de Stigter H.C. e Widmark J.G.V. (1995) - *A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats*. Marine Micropaleontology, 26, 3-15.
- Lee J.J. e Anderson O.R. (1991) - *Biology of foraminifera*. Academic Press, London, 368 pp.
- Leoni L. e Saitta M. (1976) - *X-ray fluorescence analysis of 29 traces elements in rock and mineral standard*. Rend. Soc. It. Min. Petrol., 32, 497-510.
- Leoni L., Menichini M. e Saitta M. (1982) - *Determination of S, Cl and F in silicate rocks by X-ray fluorescence analyses*. X-Ray Spectrom., 11, 156-158.
- Lidz L. (1965) - *Sedimentary environment and foraminiferal parameters: Nantucket Bay, Massachusetts*. Limnology and Oceanography, 10, 392-402.
- Loeblich A.R.Jr. e Tappan H. (1988) - *Foraminiferal Genera and their classification*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1 and 2, 1-970 and 1-212.
- Lutze G.F. e Altenbach A. (1991) - *Technik und Signifikanz der Lebendfärbung benthischer Foraminiferen mit Bengalrot*. Geol. Jahrb., 128, 251-265.
- Murray J.W. (1991) - *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. Longman Scientific and Technical, Harlow, 397 pp.
- Naidu T.Y., Rao D.C. e Rao M.S. (1985) - *Foraminifera as pollution indicators in the Visakhapatnam Harbour Complex, east coast of India*. Bull. Geol. Min. Met. Soc. India, 52, 88-96.
- Pambianchi P., Rosso G. e Frascari F. (1994) - *Nutrienti e sostanza organica nei sedimenti della Sacca di Goro*. In: Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo, 2° anno di ricerche, (S. Bencivelli, N. Castaldi e D. Finessi, a cura di), pp. 269-289, Franco Angeli s.r.l., Milano.
- Poag C.W. (1978) - *Paired foraminiferal ecophenotypes in Gulf Coast estuaries: ecological and paleoecological implication*. Trans. Gulf Coast Ass. of Geol. Soc., 28, 395-421.
- Prater L.B. e Anderson M.A. (1977) - *A 96 hour bioassay of other creek Ohio*. Water Pollut. Control Fed., 49, 2099-2106.
- Pugnetti A., Viaroli P. e Ferrari I. (1992) - *Processes leading to dystrophy in a Po River Delta lagoon (Sacca di Goro): phytoplankton-macroalgae interactions*. In: Marine Coastal Eutrophication, (R.A. Vollenweider, R. Marchetti and R. Viviani, eds), pp. 445-456, Elsevier, Amsterdam.

- Rinaldi A., Montanari G., Ghetti A., Ferrari C.R. e Ferrari A. (1992) - *Eutrophy and dystrophy in the Goro Lagoon (Italy)*. In: Marine Coastal Eutrophication, (R.A. Vollenweider, R. Marchetti, and R. Viviani, eds), pp. 457-470, Elsevier, Amsterdam.
- Schafer C. T., Smith J. N. e Loring D. H. (1980) - *Recent Sedimentation Events at the Head of Saguenay Fjord, Canada*. Environ. Geol., 3, 139-150.
- Seiglie G.A. (1964) - *Significación de los foraminíferos anormales de la laguna Unare*. Laguna, 1, 6.
- Sharifi A.R., Croudace I.W. e Austin R.L. (1991) - *Benthic foraminiferids as pollution indicators in Southampton Water, southern England, U.K*. Journal of Micropaleontology, 10(1), 109-113.
- Stouff V., Geslin E., Debenay J.-P. e Lesourd M. (1999) - *Origin of morphological abnormalities in Ammonia (Foraminifera): studies in laboratory and natural environments*. Journal of Foraminiferal Research, 29, 152-170.
- Stubbles S. (1993) - *Recent benthic Foraminifera as indicators of pollution in Restronguet Creek, Cornwall*. Proceedings of the Ussher Society, 8:200-204.
- Vollenweider R.A., Marchetti R. e Viviani R. (eds.) (1992) - *Marine Coastal Eutrophication*. Elsevier, Amsterdam, 1043 pp.
- Walker D., Linton A.E. e Schafer, C.T. (1974) - *Sudan Black B: a superior stain to Rose Bengal for distinguishing living from non-living foraminifera*. Journal of Foraminiferal Research, 4, 205-215.
- Walton W.R. (1952) - *Techniques for recognition of living foraminifera*. Contr. Cushman Found. Foram. Res., 3, 56-60.
- Watkins J.G. (1961) - *Foraminiferal ecology around the Orange County, California, ocean sewer outfall*. Micropaleontology, 7, 199-206.
- Wright R.C. (1968) - *Miliolidae (foraminiferos) recientes del estuario del Rio Quequén Grande (Prov. de Buenos Aires)*. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales 'Bernardino Rivadavia', Hidrobiología, 2, 225-256.
- Yanko V., Ahmad M. e Kaminski M.A. (1998) - *Morphological deformities of benthic foraminiferal tests in response to pollution by heavy metals: implications for pollution monitoring*. Journal of Foraminiferal Research, 28, 177-200.
- Yanko V., Kronfeld J. e Flexer A. (1994) - *Response of benthic foraminifera to various pollution sources: implications for pollution monitoring*. Journal of Foraminiferal Research, 24, 1-17.
- Zampi M. e D'Onofrio S. (1984) - *I foraminiferi dello stagno di S. Gilla (Cagliari)*. Atti Soc.Tosc.Sci.Nat., Mem., 91, 237-277
- Zampi M. e D'Onofrio S. (1987) - *I foraminiferi della laguna di Levante (Orbetello, Grosseto)*. Atti Soc.Tosc.Sci.Nat. Mem., 93, 101-127
- Zaninetti L. (1982) - *Les foraminifères des marais salants de Salin-de-Girand (Sud de la France): milieu de vie et transport dans le salin, comparaison avec les microfossiles marines*. Géologie Méditerranéenne, 9, 447-470.

Manoscritto ricevuto il 10/12/1999, accettato il 7/2/2000.

**Appendice 1: Lista faunistica (specie, formae e morfotipi menzionati nel testo)**

- Ammonia beccarii* (Linnaeus) forma *beccarii* Linnaeus = *Nautilus beccarii* Linnaeus 1758  
*Ammonia parkinsoniana* (d'Orbigny) forma *parkinsoniana* (d'Orbigny) = *Rosalina parkinsoniana* d'Orbigny, 1839  
*Ammonia parkinsoniana* (d'Orbigny) forma *tepida* Cushman = *Rotalia beccarii* (Linnaeus) var. *tepida* Cushman, 1926  
*Ammonia perlucida* (Heron-Allen and Earland) = *Rotalia perlucida* Heron-Allen and Earland, 1913  
*Cassidulina laevigata carinata* Silvestri, 1896  
*Criboelphidium gunteri* (Cole) = *Elphidium gunteri* Cole, 1931  
*Criboelphidium poeyanum* (d'Orbigny) forma *decipiens* (Costa) = *Polystomella decipiens* Costa, 1856  
*Elphidium advenum* (Cushman) = *Polystomella advena* Cushman, 1922  
*Haynesina germanica* (Ehrenberg) = *Nonion germanica* Ehrenberg, 1840  
*Haynesina granosa* (d'Orbigny) forma *lidoensis* (Cushman) = *Elphidium lidoense* Cushman, 1936  
*Quinqueloculina seminulum* (Linnaeus) = *Serpula seminula* Linnaeus, 1758  
*Trochammina inflata* (Montagu) = *Nautilus inflatus* Montagu, 1808

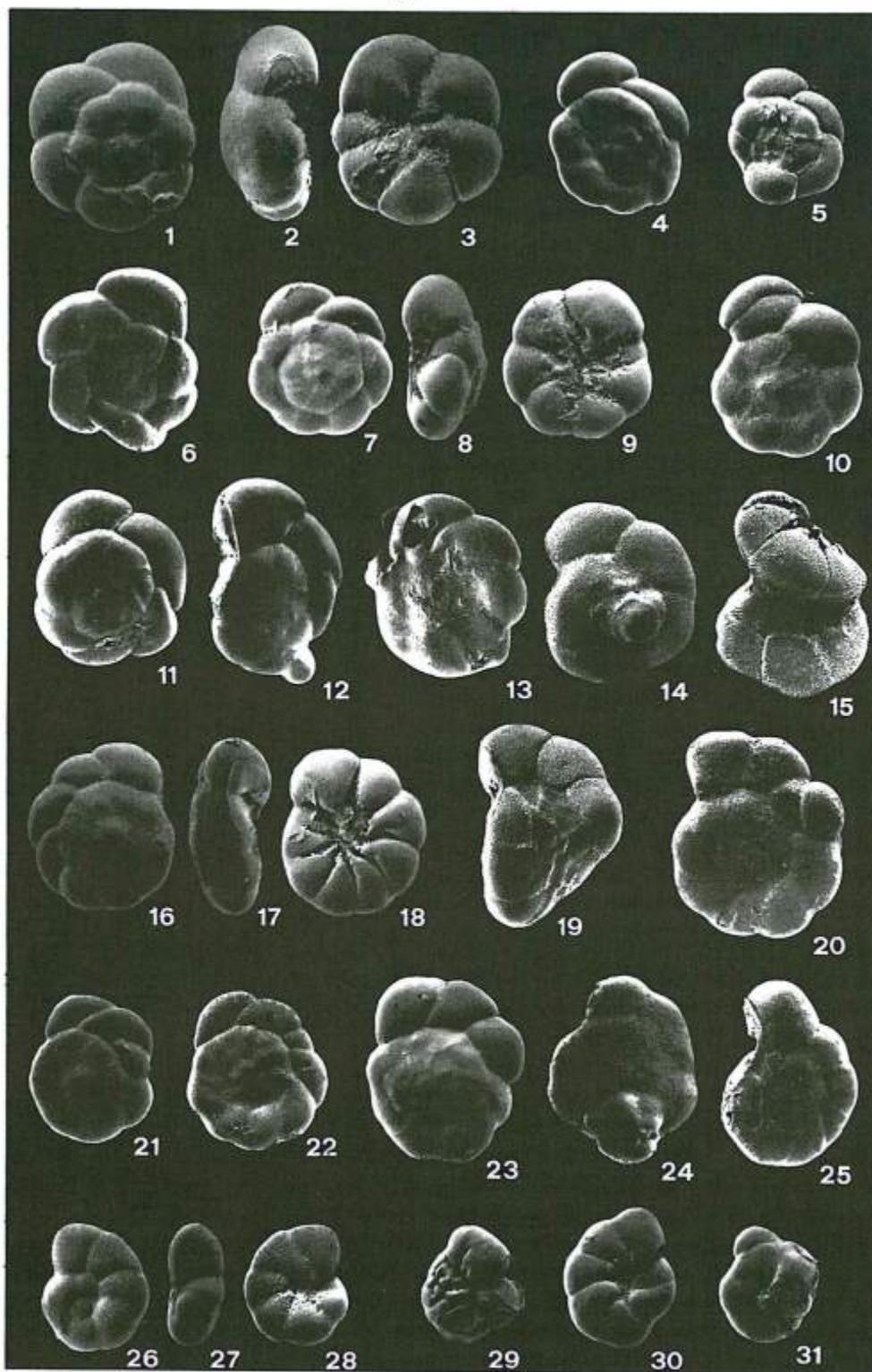
**Appendice 2**

Fotografie al microscopio elettronico a scansione di esemplari normali e di esemplari con anomalie morfologiche di foraminiferi bentonici della Sacca di Goro. 1-6: *Ammonia parkinsoniana* (d'Orbigny) forma *tepida* (Cushman) morfotipo 1, esemplare normale (1 vista spirale, 2 vista laterale, 3 vista ombelicale, x54), esemplari con disposizione distorta delle camere (4, x 36 e 6, x96) ed esemplare con camera di dimensioni ridotte (5, x54); 7-15: *Ammonia parkinsoniana* (d'Orbigny) forma *tepida* morfotipo 2, esemplare normale (7 vista spirale, 8 vista laterale, 9 vista ombelicale, x36) ed esemplari con camera di forma aberrante provvista di camera aggiuntiva anormale (10, x54; 12, x82.5; 13, x85), esemplare con disposizione distorta delle camere (11, x85), esemplare con camera sporgente (14, x104) e "fratelli siamesi" (15, x54); 16-25: *Ammonia parkinsoniana* (d'Orbigny) forma *tepida* morfotipo 3, esemplare normale (16 vista spirale, 17 vista laterale, 18 vista ombelicale, x36), esemplare con variazione della direzione di avvolgimento (19, x54), esemplari con una o più camere di dimensioni ridotte (20, x80; 21, x36; 22, x36), esemplare con guscio non completamente sviluppato (23, x36), esemplare con camera aggiuntiva anormale (24, x54) ed esemplare con camera di forma aberrante (25, x78); 26-31: *Ammonia perlucida* (Heron-Allen e Earland), esemplare normale (26 vista spirale, 27 vista laterale, 28 vista ombelicale, x36), "fratelli siamesi" (29, x36), esemplari con guscio non completamente sviluppato (30, x71) e camera aggiuntiva anormale (31, x36).

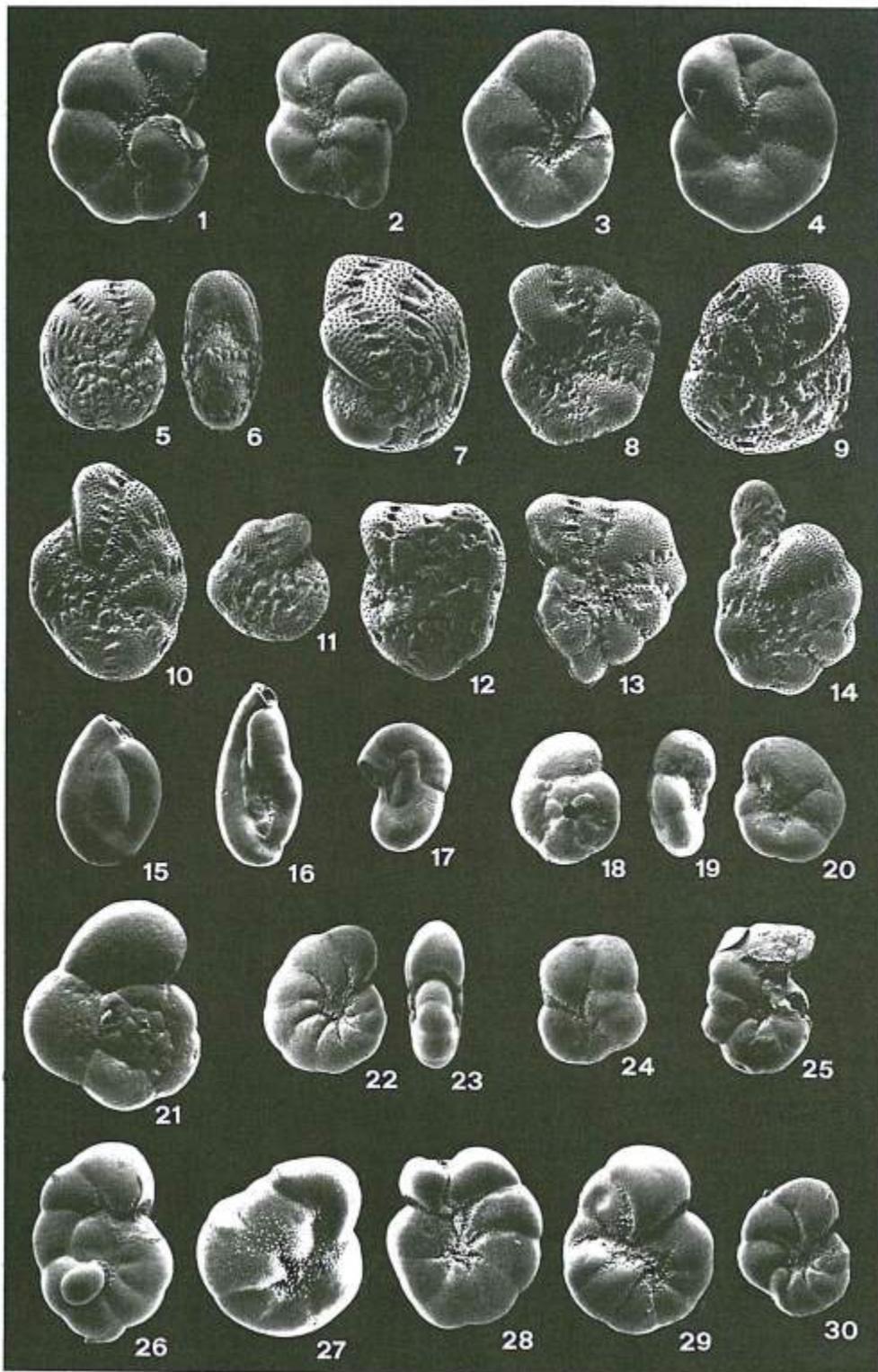
**Appendice 3**

Fotografie al microscopio elettronico a scansione di esemplari normali e di esemplari con anomalie morfologiche di foraminiferi bentonici della Sacca di Goro. 1-4: *Ammonia perlucida* (Heron-Allen e Earland), esemplare con camera sporgente (1, x36), esemplare con camera aggiuntiva anormale (2, x54), esemplare con camera di dimensioni ridotte (3, x71) ed esemplare con camera di forma aberrante (4, x36); 5-14: *Criboelphidium gunteri* (Cole), esemplare normale (5 vista di fianco e 6 vista laterale; x36), "fratelli siamesi" (7, x71), esemplare con camera di dimensioni ridotte e camera aggiuntiva anormale (8, x54), esemplari con camera di ridotte dimensioni (9, x107; 11, x54; 12, x90), esemplare con camera di dimensioni ridotte e camera di forma aberrante (13, x54) ed esemplare con camera sporgente (14, x54); 15-17: *Quinqueloculina seminulum* (Linnaeus), esemplare normale (15, x54), esemplare con disposizione distorta delle camere (16, x54) ed esemplare con camera di forma aberrante (17, x54); 18-21: *Trochammina inflata* (Montagu), esemplare normale (18 vista spirale, 19 vista laterale, 20 vista ombelicale; x54) ed esemplare con camera di forma aberrante (21, x71); 22-30: *Haynesina germanica* (Ehrenberg), esemplare normale (22, vista di fianco e 23, vista laterale; x71), esemplari con guscio non completamente sviluppato (24, x36; 30, x36), "fratelli siamesi" (25, x36), esemplare con disposizione distorta delle camere e camera aggiuntiva anormale (26, x54), ed esemplari con camera di dimensioni ridotte (27, x107; 28, x75; 29, x54).

## Appendice 2



Appendice 3



## Risposta delle comunità lagunari ad un evento di disturbo

Elisa Anna Fano, Giuseppe Castaldelli, Michele Mistri,  
Giorgio Rossi e Remigio Rossi

Dipartimento di Biologia, Università di Ferrara,  
Via Borsari 46, 44100 Ferrara

### Riassunto

E' stato studiato l'effetto del disturbo determinato dall'apertura di una nuova bocca a mare nella Sacca di Goro, la laguna più meridionale connessa al Delta del Po, sulle comunità a macroalghe e a macrozoobenthos. Sono stati confrontati i risultati di campionamenti mensili effettuati per tutto il 1993 e il 1998 in tre stazioni rappresentative di tre diverse situazioni abiotiche. L'apertura della nuova bocca ha determinato l'affermarsi di una macroalga precedentemente sporadica: *Cladophora* sp. var. *liniformis* e di un bivalve esotico *Musculista senhousia* ed infine la perdita di peculiarità delle tre stazioni, che rispondono, diversamente dal passato, in modo molto simile alle variazioni stagionali dei parametri abiotici.

### Introduzione

Gli ambienti di transizione sono ecosistemi ecologicamente molto importanti perché caratterizzati da proprietà peculiari e da specie in parte esclusive e in parte tipiche dei due ecosistemi limitrofi, in altri termini le zone ecotonali mostrano elevati valori di biodiversità sia tassonomica che funzionale. Gli ambienti di transizione costieri marini, comprendendo con questo termine anche le lagune costiere e gli estuari, sono stati soggetti in questi ultimi anni a marcati incrementi dei nutrienti con conseguenti fenomeni di eutrofizzazione; nel tentativo di diminuire il disturbo determinato da tali eventi, l'uomo è spesso intervenuto modificando l'assetto morfologico e quindi l'idrologia di questi ecosistemi (e.g. escavo dei canali sub-lagunari, apertura di bocche a mare artificiali, ecc.). Queste modificazioni dell'habitat, in modo particolare nelle lagune, hanno determinato l'affermarsi, nel comparto produttivo, delle macroalghe pleustofitiche, flottanti e non aderenti al substrato, che spesso hanno sostituito quasi completamente le rizofite (Schramm & Nienhuis, 1996).

L'incremento di nutrienti disponibili per queste macroalghe efemerale, determinato da eventi naturali ed antropici di fertilizzazione, favorisce la crescita e l'accumulo nelle zone a maggiore calma idrodinamica di letti macroalgali che, alla fine del loro ciclo biologico rapidamente vanno incontro a morte, decomposizione e mineralizzazione e possono rappresentare un fattore di disturbo per l'energetica lagunare; infatti tali fenomeni interessano ampie aree delle lagune che vengono così caratterizzate da prolungate crisi anossiche e da produzione ed accumulo di sostanze tossiche. In presenza di scarsa disponibilità di ossigeno la mineralizzazione della sostanza organica morta segue vie ossidative anaerobiche, quali la solfato riduzione (Canfield et al., 1993), con accumulo di acido solfidrico e solfuri nel sedimento questo determina una riduzione della macrofauna (Raffaelli et al., 1998) e soprattutto della infauna (Fenchel, 1996).

Le modificazioni nel primo livello trofico infatti, possono determinare profonde alterazioni nella struttura della comunità macrozoobentonica, fondamentale anello di congiunzione con i più elevati

livelli trofici (i.e. decapodi e pesci), essa infatti per caratteristiche intrinseche quali scarsa mobilità e diversificata composizione tassonomica risulta particolarmente suscettibile ad eventi di disturbo (Pearson & Rosenberg, 1978; Diaz & Rosenberg, 1995).

### La Sacca di Goro

La Sacca di Goro è la laguna più meridionale fra quelle connesse con il delta del Po, derivata dal trasporto di detriti solidi da parte dei rami fluviali (in particolare del Po di Goro) e dalla presenza di fondali bassi del mare antistante che determinano perdita di energia cinetica da parte delle particelle in sospensione veicolate dal fiume con conseguente rapida sedimentazione.

Le ininterrotte azioni del mare e del Po, sommate a numerosi interventi antropici quali processi di bonifica, costruzione di argini, escavazioni di canali navigabili e rafforzamenti del cordone litorale, hanno modellato la Sacca fino al raggiungimento della conformazione attuale.

La Sacca di Goro presenta oggi un'estensione di circa 2.600 ettari ed è profonda mediamente 1.5 m. Sia la Sacca che l'area circostante sono interessate da forti fenomeni di subsidenza naturale, incrementati dagli interventi antropici che come già detto hanno più volte interessato quest'area.

La Sacca è delimitata a nord dal centro abitato di Goro, e proseguendo in senso orario, da arginature artificiali fino a Gorino. Continuando verso Est si incontra l'argine naturale del Po di Goro il quale è intersecato da diversi canali che consentono un collegamento tra il fiume e la Sacca stessa. A Sud la Sacca viene parzialmente delimitata da uno scanno sabbioso.

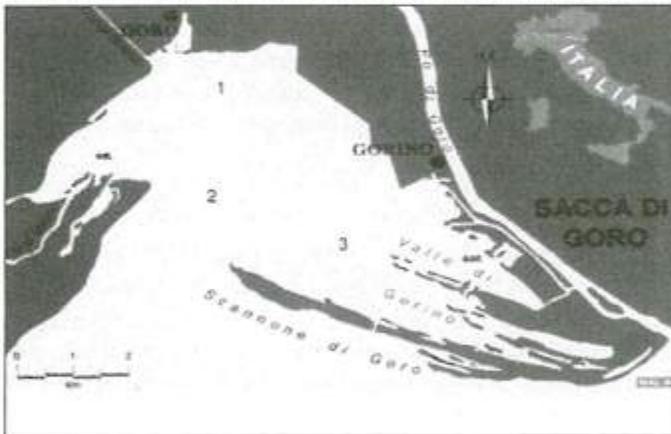


Figura 1 - Mappa della Sacca di Goro nei primi anni '90.

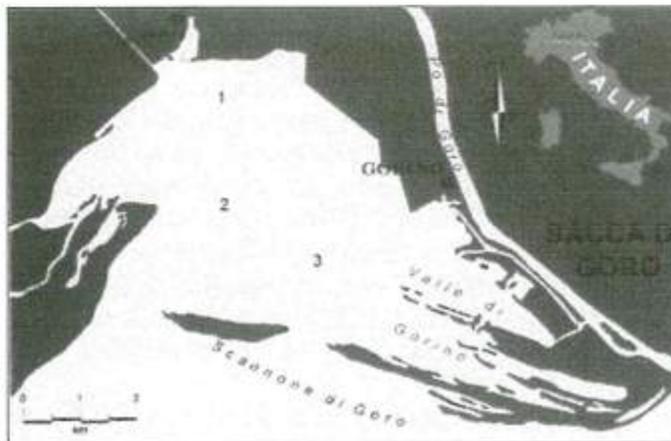


Figura 2 - Mappa della Sacca di Goro nel 1997.

La Sacca fino all'inizio degli anni '90 era caratterizzata da un'unica bocca a mare (Fig. 1).

E' appunto in quegli anni che, al fine di migliorare la circolazione idrica entro la Sacca, per evitare quindi i sempre più frequenti fenomeni di anossia nelle zone più confinate (Valle di Gorino) (Viaroli et al., 1993), vennero aperti due varchi sullo scanno. Su uno dei due tagli fu costruito un impianto idrovoro al fine di accelerare il ricambio delle acque della Sacca nel periodo estivo. L'impianto in questione si rivelò inadeguato e cadde rapidamente in disuso.

Sull'altro taglio artificiale, largo non più di 10 m, i fenomeni naturali di erosione dovuti al moto ondoso ed al trasporto di sedimenti fluviali accentuati in occasione della piena eccezionale del Po del Novembre 1994 hanno agito intensamente determinando forti modificazioni morfologiche: nel 1997 sullo scanno, a partire dal piccolo taglio di qualche anno prima, si è aperto un varco largo circa 800 m. La naturale evoluzione dello scanno ha inoltre causato un restringimento della vecchia bocca a mare (Simeoni, *com. pers.*, 1998) (Fig. 2).

Sull'altra sponda della bocca a mare si incontra la spiaggia di Volano, posta a meridione dell'omonimo ramo del Po. Il Po di Volano a Ovest e il ramo deltizio del Po di Goro a Est sono i maggiori responsabili dell'apporto di acqua dolce nella Sacca. Altri immissari (canali Bianco e Bonello) hanno portate stagionali variabili essendo queste influenzate dall'uso delle acque a scopo irriguo; questi canali presentano portate massime nei mesi invernali e minime in quelli estivi (Pambianchi, 1987). A questi è possibile aggiungere le acque che rifluiscono dalle aree agricole circostanti dove sono presenti tre idrovore (Giralda, Romanina e Bonello).

L'acqua salata entra in Sacca tramite la bocca a mare naturale e tramite il varco che è stato creato nello scanno. La salinità delle acque provenienti dal mare che entrano in Sacca si attesta su valori prossimi al 30‰.

### Scopo del lavoro

Scopo del presente lavoro è quello di evidenziare le risposte delle comunità macroalgale e macrozoobentonica alle modificazioni nella morfologia e nell'idrodinamismo della Sacca imposte dall'apertura di una nuova bocca a mare; quindi di verificare l'evoluzione dell'ecosistema lagunare a seguito del disturbo creato da una seconda immissione di masse d'acqua marina. Sono stati paragonati i risultati ottenuti in due campagne di campionamenti mensili della durata di un anno ognuna: la prima dal dicembre 1992 al dicembre 1993 la seconda dal dicembre 1997 al dicembre 1998.

### Caratteristiche delle stazioni di campionamento

L'indagine è stata condotta in tre stazioni di campionamento. Ognuna di queste è stata scelta in quanto rappresentativa di un'area più ampia della Sacca con differenti caratteristiche biotiche (Colombo et al., 1994).

Nella zona a Nord della Sacca è stata scelta la stazione 1. La zona è poco influenzata dalle correnti di marea e riceve apporti di acqua dolce dal Po di Volano e dal Canal Bianco. Dal punto di vista idrodinamico questa zona può essere definita moderatamente calma.

Nella zona centrale della Sacca è stata scelta la stazione 2. Questa zona è direttamente collegata alla vecchia bocca a mare e quindi maggiormente influenzata dalle correnti di marea. Le condizioni idrodinamiche di questa parte di Sacca sono influenzate dalle masse d'acqua marine in entrata e in uscita dalla vecchia bocca.

Nella parte orientale i campionamenti sono stati effettuati nella stazione 3. Questa zona era la più riparata nei confronti dell'azione vivificante del mare prima dell'apertura della bocca artificiale.

### Raccolta e trattamento dei campioni

Nelle stazioni sono state effettuate con le stesse modalità due serie di campionamenti mensili la prima dal dicembre 1992 al dicembre 1993, la seconda dal dicembre 1997 al dicembre 1998. Le uscite in Sacca sono state effettuate con un natante dell'Amministrazione Provinciale di Ferrara dotato di sonde multiparametriche che hanno permesso un istantaneo rilevamento di alcuni parametri abiotici (profondità, trasparenza, temperatura, ossigeno disciolto e salinità).

La raccolta delle alghe pleustofitiche è stata effettuata tramite un retino (bocca di 40 cm e maglia di 490  $\mu$ m) trascinato a 10 cm dal fondo per 1 metro.

Gli animali associati al sedimento nudo sono stati campionati per mezzo di una benna (benna di Van Veen) avente un'area di prelievo unitaria di 0,06 m<sup>2</sup>.

Ogni mese, per entrambi i materiali biologici campionati, sono state eseguite tre repliche per ciascuna delle stazioni.

In laboratorio la componente vegetale è stata classificata e separata in taxa e di ognuno di questi, laddove possibile, è stata valutata la biomassa (peso secco privo di ceneri, Ash Free Dry Weight; peso secco in stufa a 60°C per 72 ore, peso ceneri in muffola a 800°C per 5 ore).

Il materiale raccolto mediante la benna è stato setacciato su maglia di 490  $\mu$ m per eliminare il sedimento, fissato con formalina all'8% tamponata con esometileritetramina e poi colorato allo scopo

di rendere più semplice l'individuazione degli animali. La colorazione è stata fatta con una soluzione composta da 100 ml di acqua distillata, 1 ml di soluzione di rosa bengala e 5 ml di soluzione concentrata di fenolo).

Gli animali sono stati classificati sia su base tassonomica sia su base funzionale (Livingston et al., 1997).

### Elaborazione dei dati

Tutti i dati raccolti nelle due serie di campionamenti sono stati espressi come valore medio stagionale (media dei nove campioni per stazione  $\pm$  deviazione standard).

I parametri raccolti mediante sonda multiparametrica non hanno subito nessuna elaborazione (escluso l'ossigeno) per cui sono stati semplicemente trascritti i valori registrati durante i campionamenti. Per l'ossigeno è stata calcolata la percentuale di saturazione.

Dei banchi macroalgali è stata valutata la composizione tassonomica qualitativa e quantitativa (espressa quest'ultima come valore medio delle nove repliche in g di biomassa  $\cdot$  m<sup>-2</sup>).

Per quanto riguarda gli animali sono state calcolate le densità medie stagionali (sulle nove repliche per ciascuna stazione di campionamento (N° individui  $\cdot$  m<sup>-2</sup>).

Ai valori delle densità assolute stagionali calcolate per ogni stazione in ciascuna delle due campagne di campionamento è stato applicato il test statistico U di Mann Whitney per evidenziare l'eventuale significatività delle differenze.

Si è passati quindi all'analisi funzionale. I taxa sono stati classificati secondo il gruppo trofico di appartenenza. Sono stati individuati i seguenti gruppi trofici:

1. grazers - erbivori pascolanti che si nutrono di materiale vegetale vivo (GR)
2. scrapers - raschiatori che si nutrono di materiale vivo o materiale morto raschiandolo dal substrato (SC)
3. suspension feeders - filtratori della colonna d'acqua (SF)
4. surface deposit feeders - detritivori epifaunali che si nutrono di particolato depositato sul substrato (SDF)
5. sub surface deposit feeders - detritivori infaunali che si nutrono di particolato depositato nel substrato
6. predatori - predatori che si nutrono di una delle categorie precedenti (PR).

La valutazione della struttura di comunità in termini tassonomici è stata realizzata mediante l'utilizzo degli indici strutturali classici:

Indice di Diversità (H' di Shannon)

$$H' = -\sum p_i \ln p_i \quad [1]$$

dove  $p_i = n_i / N$ ;  $n_i$  = numero di individui della specie i-esima,  $N$  = numero totale di individui trovati;

Indice di Ricchezza in specie (D di Margalef)

$$D = (S-1) / \ln N \quad [2]$$

dove  $S$  = numero dei taxa e  $N$  = numero totale di individui;

Indice di Evenness (J di Pielou)

$$J = H' / \ln S \quad [3]$$

dove  $H'$  = indice di diversità di Shannon e  $S$  = numero dei taxa.

Per valutare la similarità quali-quantitativa delle singole comunità di ogni stagione e nei due anni, è stato applicato un test multivariato non parametrico: il Multi Dimensional Scaling (MDS). Questo test permette di riportare su di un piano bidimensionale i singoli punti campione; la distanza fra questi è inversamente proporzionale alla loro similarità (valutata col il metodo City block-Manhattan e trasformata con il metodo UPGMA) (Field et al., 1982). Normalmente per questo tipo di test vengono usati come dati di partenza i valori assoluti di densità trasformati tramite doppia radice quadrata. Il test dell'analisi delle similarità (ANOSIM, Clarke, 1993) è stato quindi applicato a

ciascuna matrice di similarità al fine di valutare l'esistenza di differenze significative tra le stagioni. Gli elementi delle matrici sono stati classificati per ranghi ed è stata calcolata la statistica

$$R = (r_b - r_w) / \{n(n-1) / 4\} \quad [4]$$

dove  $n$  = numero di campioni totale,  $r_b$  = similarità media per ranghi tra ciascun paio di repliche in differenti stagioni,  $r_w$  = similarità media per ranghi tra ciascun paio di repliche nella stessa stagione. Il campo di esistenza di  $R$  va da -1 a +1, con il valore di 0 corrispondente alla situazione in cui non vi sono differenze stagionali, cosicché tutti i campioni (stazioni) sembrerebbero repliche della stessa "popolazione" di siti della stessa stagione. La significatività del valore calcolato di  $R$  è stabilita dal confronto con la distribuzione dei valori di  $R$  ottenuta mediante una serie di permutazioni (999) ri-assegnando casualmente il label stagionale, con l'ipotesi zero che non vi siano differenze stagionali tra le comunità macrobentoniche nei siti campionati.

## Risultati

Vengono di seguito riportati i dati relativi al confronto 1993-1998 relativamente alle tre stazioni 1, 2 e 3.

### Parametri abiotici

I valori mensili dei parametri abiotici misurati in situ nelle 3 stazioni nella campagna di campionamenti svoltasi nel 1993, sono riportati nella tabella 1, mentre quelli relativi al 1998 sono riportati nella tabella 2. Infine nella tabella 3 sono riportati i valori medi annui confrontati nei due anni di campionamento.

Confrontando i dati raccolti nel 1993 con quelli raccolti nel 1998 si può notare in questo ultimo anno una maggiore somiglianza fra le tre stazioni, infatti mentre nel 1993 la stazione 3 risultava marcatamente diversa dalle altre due, nel 1998 le differenze sono riscontrabili solo per la percentuale di saturazione dell'  $O_2$  che comunque risulta generalmente più bassa. La salinità sul fondo risulta anch'essa mediamente più bassa e tale dato non è in accordo con il potenziale maggior ingresso di acqua marina.

Tabella 1 - Parametri abiotici registrati nelle 3 stazioni della Sacca di Goro nel 1993.

	Temperatura acqua			Profondità			$O_2$ (Saturazione)			Salinità		
	(°C)			(cm)			(%)			(‰)		
	Stazioni			Stazioni			Stazioni			Stazioni		
1993	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DIC	7,7	9,4	6,6	240	210	170	105	113	110	30	33	25
GEN	8	6,8	5,7	160	140	170	136	107	110	24	22	18
FEB	7,7	7,7	7,2	190	160	100	113	128	117	31	31	20
MAR	12,5	12,2	13,8	185	170	120	158	151	119	22	25	8
APR	11,4	11,4	10,8	170	180	130	109	101	111	28	30	25
MAG	19,8	20,2	20,6	150	140	100	145	125	121	20	23	17
GIU	24,7	24,5	25,1	200	150	120	121	119	124	25	24	23
LUG	28,3	28,5	27,5	200	170	140	93	21	47	24	24	23
SETT	18,3	17,6	16,5	230	210	160	109	100	117	35	35	32
OTT	15	16	13,7	190	160	120	107	97	102	26	28	24
NOV	14,1	14,4	12,9	190	210	170	92	90	105	28	28	21
DIC	12,2	11,8	8,7	170	160	120	70	70	93	36	32	34

### Parametri biotici

#### Componente macroalgale

Nelle tre stazioni indagate, sia nel 1993 che nel 1998, sono assenti le rizofite e presenti le sole macroalghe pleustofitiche, non ancorate al substrato, che si presentano sotto forma di banchi misti

flottanti nella colonna d'acqua. Le specie vegetali presenti in tali banchi in quantità rilevabili sono riportate nella Tabella 4. Come si vede, nel 1998 risultano completamente assenti *Ceramium* sp. e *Melosira moniliformis* che erano presenti, sebbene in forma sporadica, nel 1993; inoltre si nota che *Ulva rigida* risulta presente in un minor numero di stagioni nella stazione 3 e presente in un maggior numero di stagioni nelle altre due stazioni; infine si nota soprattutto nella stazione 3 la maggiore presenza della *Cladophora* sp.

Tabella 2 - Parametri abiotici registrati nelle tre stazioni della Sacca di Goro nel 1998.

	Temperatura acqua (°C)			Profondità (cm)			O <sub>2</sub> (Saturazione) (%)			Salinità (‰)		
	Stazioni			Stazioni			Stazioni			Stazioni		
1998	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DIC	10,1	8,2	5,8	180	200	150	83	89	88	28	26	22
GEN	8,7	8,9	7,7	150	170	170	122	120	120	28	29	25
FEB	8,1	8,1	8	150	170	170	122	123	135	25	26	25
MAR	13,3	13,9	14,6	150	150	120	95	103	108	20	23	24
APR	12,6	12,3	12	140	140	80	106	82	110	17	22	25
MAG	18,2	18,3	18,8	90	90	90	135	131	127	23	25	24
GIU	26,5	26,2	25,6	170	150	140	50	65	103	18	20	20
LUG	22,3	22	23	140	150	140	55	76	126	25	27	23
AGO	26,4	26	26,4	170	180	170	70	65	75	13	14	16
SETT	21	21,1	21	160	180	160	82	83	107	21	24	22
OTT	16,6	17	17	150	180	170	108	104	118	27	26	27
NOV	10,5	10,9	9,9	180	180	210	72	72	84	26	24	24
DIC	11,6	10,7	10,2	230	200	200	59	68	74	31	27	25

Tabella 3 - Confronto dei valori medi dei parametri abiotici registrati nelle tre stazioni della Sacca di Goro.

		Temperatura acqua (°C)			Profondità (cm)			O <sub>2</sub> (Saturazione) (%)			Salinità (‰)		
		Stazioni			Stazioni			Stazioni			Stazioni		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1993	media	14,975	15,042	14,092	189,58	171,67	135	113,17	101,83	106,33	27,417	27,917	22,5
	std	6,6629	6,6781	7,1651	26,325	25,879	26,458	24,241	32,752	20,632	4,926	4,3161	6,789
1998	media	15,838	15,662	15,385	158,46	164,62	151,54	89,154	90,846	105,77	23,231	24,077	23,231
	std	6,4996	6,562	7,0945	31,582	29,33	38,045	27,826	23,083	20,092	5,1665	3,8397	2,8034

Tale situazione risulta ancor più evidente se si analizzano le composizioni dei banchi macroalgali. Vengono espressi nei grafici (Fig. 3) i valori medi di biomassa per singola macroalga (g AFDW /m<sup>2</sup> ± dev.st). Nel 1998 rispetto al 1993 si può notare una generica diminuzione della biomassa più spiccata nella staz. 3 rispetto alle altre, ed una maggiore abbondanza di *Cladophora* particolarmente evidente sempre nella staz. 3. La conferma statistica di questi risultati viene dalla applicazione del test U di Mann-Whitney sulle abbondanze assolute delle singole specie macroalgali presenti stagionalmente nelle tre stazioni (Tab. 5).

Tabella 4 - Presenza dei taxa macroalgali nelle tre stazioni della Sacca di Goro.

Stazione 1	1993				1998			
	INV	PRI	EST	AUT	INV	PRI	EST	AUT
taxa macroalgali								
<i>Gracilaria verrucosa</i>	*	*	*	*	*	*	*	*
<i>Ulva rigida</i>				*	*	*	*	*
<i>Cladophora</i>	*						*	*
<i>Ceramium</i>		*						
<i>Melosira moniliformis</i>	*	*						
Stazione 2								
taxa macroalgali								
<i>Gracilaria verrucosa</i>	*	*	*	*	*	*	*	*
<i>Ulva rigida</i>		*	*			*	*	*
<i>Cladophora</i>			*	*				*
<i>Ceramium</i>	*							
<i>Melosira moniliformis</i>	*							
Stazione 3								
taxa macroalgali								
<i>Gracilaria verrucosa</i>	*	*	*	*	*	*	*	*
<i>Ulva rigida</i>	*	*	*	*		*	*	
<i>Cladophora</i>	*			*	*	*	*	*
<i>Ceramium</i>								
<i>Melosira moniliformis</i>	*							

Tabella 5 - Confronto statistico (test U di Mann-Whitney) fra le abbondanze assolute (g biom/m<sup>2</sup>) delle singole macroalghe nelle tre stazioni della Sacca di Goro.

	Gracilaria				Cladophora				Ulva			
	Inv93/ Inv98	Pri93/ Pri98	Est93/ Est98	Aut93/ Aut98	Inv93/ Inv98	Pri93/ Pri98	Est93/ Est98	Aut93/ Aut98	Inv93/ Inv98	Pri93/ Pri98	Est93/ Est98	Aut93/ Aut98
St. 1	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
St. 2	ns											
St. 3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

*Componente macrobentonica*

In Tabella 6 sono riportati i taxa rinvenuti rispettivamente nelle stazioni 1, 2 e 3 nei due anni indagati; il numero di taxa raccolti nel 1998 è sempre inferiore a quello registrato nel 1993. I taxa coinvolti nell'impoverimento della comunità bentonica registrato nel 1998 risulta essere diversi a seconda della stazione considerata, sebbene in genere appartengano al gruppo dei bivalvi (es. *Mytilus galloprovincialis* e *Tapes philippinarum*) e dei gasteropodi (es. *Cyclope neritea*). Si verifica inoltre l'esplosione della specie *Musculista senhousia*, bivalve di origine orientale che nel 1993 risultava presente nella Sacca di Goro in quantità talmente basse da essere irrilevabile (Turolla, 1999), mentre nel 1998 compare in tutte le stagioni e in tutte le stazioni, senza quindi soluzione di continuità temporale e spaziale.

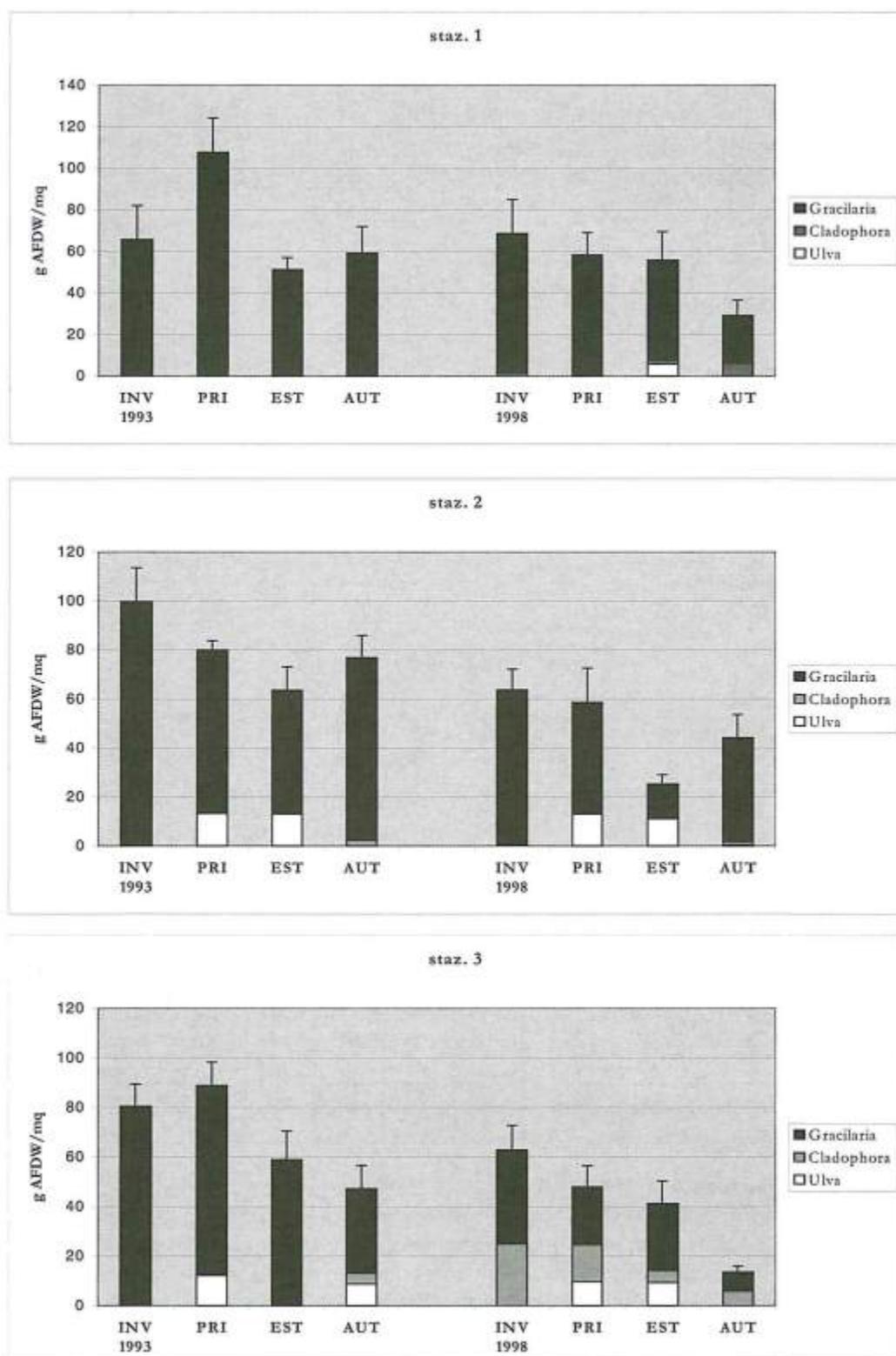


Figura 3 - Composizione dei banchi macroalgali nelle tre stazioni della Sacca di Goro.

Tabella 6 - Presenza dei taxa macrozoobentonici nelle tre stazioni della Sacca di Goro (Il colore grigio indica la presenza del taxon).

Taxa macrozoobentonici		Stazione 1		Stazione 2		Stazione 3	
		1993	1998	1993	1998	1993	1998
Celenterati	Attiniani						
Platelminti	Turbellari						
Gasteropodi	<i>Hydrobia</i> sp.						
	<i>Hinia reticulata</i>						
	<i>Haminaea bydatis</i>						
	<i>Bittium reticulatum</i>						
	<i>Chrysalid</i> sp.						
	<i>Crassostrea</i> sp.						
	<i>Cy clope neritea</i>						
Bivalvi	<i>Scapharca inaequivalvis</i>						
	<i>Mytilaster minimus</i>						
	<i>Mytilus galloprovincialis</i>						
	<i>Cerastoderma glaucum</i>						
	<i>Tapes philippinarum</i>						
	<i>Tellina</i> sp.						
	<i>Musculista senhousia</i>						
	<i>Abra ovata</i>						
Oligocheti							
Policheti	<i>Spio decoratus</i>						
	<i>Prionospio multibranchiata</i>						
	<i>Hydroides diantbus</i>						
	<i>Ficopomatus enigmaticus</i>						
	<i>Nereis succinea</i>						
	Nereidi						
	<i>Capitella capitata</i>						
	<i>Nephtys hombergi</i>						
	<i>Streblospio shrubsolii</i>						
	<i>Polydora ciliata</i>						
	<i>Eteone picta</i>						
	Phyllodocidi						
	Hesionidi						
Decapodi	<i>Palaemon elegans</i>						
	<i>Brachinotus sexdentatus</i>						
	<i>Carcinus mediterraneus</i>						
Isopodi	<i>Crangon crangon</i>						
	<i>Idotea baltica</i>						
Anfipodi	<i>Corophium insidiosum</i>						
	<i>Gammarus</i> spp.						
	<i>Microdeutopus gryllotalpa</i>						
Ostracodi							
Cirripedi	Balanidi						
Ditteri	<i>Chironomus salinarum</i>						
Urocordati	Ascidiacei						
N. Taxa totali		34	32	34	29	29	25

Tabella 7 - Struttura delle comunità macrozoobentoniche nelle tre stazioni della Sacca di Goro.

		1993				1993				1993			
		Stazione 1				Stazione 2				Stazione 3			
		Inv	Pri	Est	Aut	Inv	Pri	Est	Aut	Inv	Pri	Est	Aut
Densità	media	2887	2491	832	1865	1141	1196	2547	1138	1103	854	1588	2153
(N. ind/m <sup>2</sup> )	std	1201	1045	359	1367	552	729	654	358	706	452	129	735
Diversità		1.7	2.2	1.6	1.1	2.1	2.3	1.92	2.5	2.3	2.1	1.3	1.9
(H' Shannon)													
Ricchezza spec.		2.7	3.3	2.3	1.7	3.6	3.5	2.6	3.66	3.2	2	2.1	2.8
(D Margalef)													
Eveness		0.57	0.7	0.57	0.41	0.68	0.72	0.62	0.77	0.75	0.73	0.48	0.58
(J Pielou)													
N. tot taxa		22	27	15	15	23	25	21	25	22	17	17	21
		1998				1998				1998			
		Stazione 1				Stazione 2				Stazione 3			
		Inv	Pri	Est	Aut	Inv	Pri	Est	Aut	Inv	Pri	Est	Aut
Densità	media	6322	8879	1652	4362	3425	9345	1654	1132	7298	4041	308	5131
(N. ind/m <sup>2</sup> )	std	1524	392	331	1275	134	379	1736	114	478	309	276	133
Diversità		1.54	1.4	0.6	1.8	2.18	1.54	0.6	2.3	1.7	2.1	1.17	1.8
(H' Shannon)													
Ricchezza spec.		2.4	2	1.4	1.82	2.7	2.2	1.4	2.4	2.4	1.7	0.7	1.7
(D Margalef)													
Eveness		0.5	0.5	0.3	0.68	0.68	0.52	0.3	0.79	0.55	0.77	0.72	0.68
(J Pielou)													
N. tot taxa		21	19	11	15	22	20	11	17	21	16	6	14

La sua esplosione è dettata dalla forte competitività per il substrato che contraddistingue questo mollusco (produzione di bisso e modificazione della tessitura del substrato stesso), nonché dalla sua resistenza a stress ambientali, caratteristiche che hanno permesso a questa specie di colonizzare, dopo un periodo di latenza iniziale, in modo rapido ed efficace l'ambiente a scapito dei bivalvi prima citati (Crooks, 1996).

Nella Tabella 7 vengono riportati i parametri relativi alla struttura delle comunità macrozoobentoniche.

Dal punto di vista della densità animale (espressa come  $n^{\circ} \text{ind} \cdot \text{m}^{-2}$ ) i due anni appaiono ulteriormente differenti. Dai dati raccolti risulta chiaro un incremento (significativo al test U di Mann-Whitney) della densità macrozoobentonica nel 1998 in tutte le stazioni ad eccezione dell'estate nelle stazioni 2 e 3 e dell'autunno nella 2. Nel 1993 il massimo di densità è stato registrato nel periodo invernale nella stazione 1. Durante il 1998 invece il picco si raggiunge in primavera nella stazione 2. Un altro dato rilevante appare essere, sempre nel 1998, una variazione di densità molto più marcata nei diversi momenti stagionali in tutte le stazioni rispetto al 1993, (variabilità intra-gruppi maggiore di quella fra gruppi, Test U di Mann-Whitney). Il risultato ottenuto sembra confermare l'ipotesi emersa dall'analisi dei dati di presenza-assenza animale secondo cui nel 1998, cioè in seguito all'evento di disturbo, vengono enfatizzate le differenze tra i vari periodi dell'anno, piuttosto che quelle legate alle tre zone della Sacca scelte per l'indagine.

La diversità macrozoobentonica si assesta sempre su valori inferiori nel 1998; tale risultato deve essere principalmente imputato ad una diminuzione dell'indice di ricchezza in specie dovuto ad un decremento totale del numero di taxa, piuttosto che ad una variazione dell'indice di eveness.

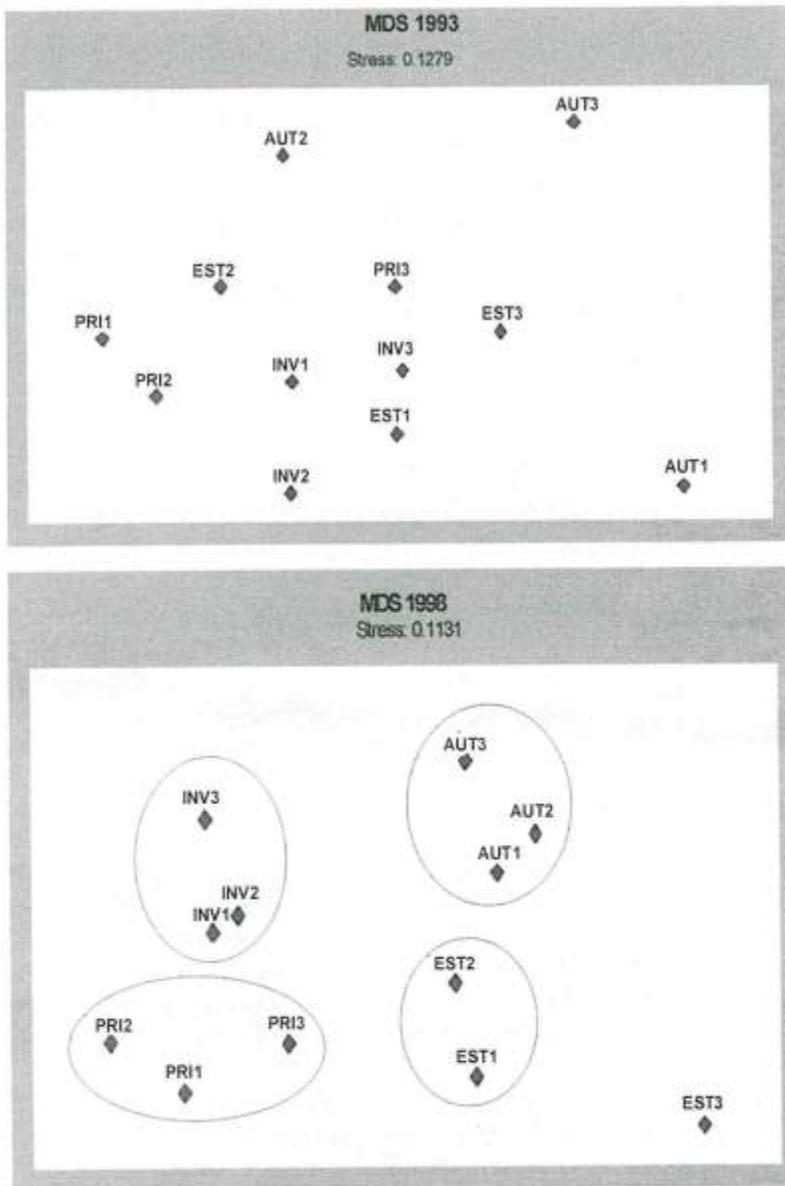


Figura 4 - Analisi multivariata (MDS) della struttura delle comunità macrozoobentoniche rinvenute nelle tre stazioni della Sacca di Goro.

ta in modo distinto da quelle delle altre due stazioni controllate nella stessa stagione. Questo ultimo risultato è spiegabile alla luce dalla particolare posizione della stazione 3 nella Sacca di Goro.

La laguna è infatti soggetta periodicamente a crisi distrofiche con associati fenomeni di ipossia delle sua acque, a volte spinte fino alla anossia, aggravate dalle alte temperature estive. Tale fenomeno è particolarmente accentuato in quella zona della Sacca denominata Valle di Gorino, riparata dall'influenza vivificatrice del mare.

La stazione 3 è posizionata proprio in tale Valle, di conseguenza la comunità animale associata al sedimento di questa zona potrebbe aver risentito più delle altre dei minor valori di ossigeno disciolto. Tale risultato evidenzia come il potenziale apporto di acqua *vivificante* dal mare, che dovrebbe entrare dalla nuova bocca, non sortisce l'effetto desiderato infatti il numero dei taxa presenti nell'estate 1996 è inferiore a quelli rinvenuti nella stessa stagione del 1993 (17 contro 6) e anche in termini

Il risultato ottenuto attraverso l'applicazione dell'analisi multivariata M.D.S. (Fig. 4) ai dati di densità della comunità animale associata al sedimento nudo.

Nel 1993 i punti-campione, corrispondenti alle singole stazioni nelle varie stagioni, non appaiono essere distribuiti in clusters, ossia raggruppamenti di punti caratterizzati rispettivamente da comunità simili; gli unici punti-campione che si discostano dalla nuvola principale, sono quelli relativi alla stazione 1, alla stazione 2 e alla stazione 3 nel periodo autunnale, come emerso, sebbene solo chiaramente per la stazione 2, precedentemente anche dall'analisi strutturale.

Appare a questo punto evidente un effetto del disturbo che ha interessato la Sacca di Goro sulle comunità di tutte le stazioni sotto controllo.

Nel 1998 infatti si individuano quattro clusters ben distinti, corrispondenti alle tre stazioni nelle quattro stagioni dell'anno, da questi raggruppamenti si discosta

la comunità della stazione 3 relativa al periodo estivo, che appare quindi struttura-

di densità si osserva un decremento del valore.

Da notare inoltre come proprio nella stazione 3 nel 1998 si assista al bloom algale della *Cladophora*, come precedentemente descritto, un'alga verde filamentosa che, per caratteristiche morfologiche, tende a formare un strato uniforme al di sopra del sedimento, impedendo in parte o del tutto gli scambi gassosi (vedi ossigeno) tra il sedimento e la colonna d'acqua influenzando la componente macrobentonica associata al sedimento stesso.

La presenza di clusters corrispondenti alle diverse stagioni del 1998 sul piano bidimensionale tracciato attraverso l'M.D.S., conferma quanto detto fino ad ora e accentua in modo ancor più evidente

**Tabella 8 - Analisi delle similarità: valori di R e significatività dei confronti a coppia.**

confronto	1993	1998
	R = 0,043	R = 0,37
inv/pri	NS	NS
inv/est	NS	p<0,01
inv/aut	NS	p<0,01
pri/est	NS	p<0,01
pri/aut	NS	p<0,01
est/aut	NS	p<0,01

l'effetto stagione sulle comunità; effetto che non può invece essere sottolineato nel 1993.

In sostanza da quanto emerso dalle analisi effettuate nel 1998 si è venuta a creare una sorta di omogeneizzazione delle comunità bentoniche proprie delle tre stazioni, fenomeno non evidenziabile nel 1993. Nella tabella 8 sono riportati i risultati del test ANOSIM per gli anni 1993 e 1998. Il valore di R per il 1993 è risultato pari a 0,043, quindi compreso all'interno della distribuzione di valori di R ottenuta mediante permutazioni casuali, e conseguentemente l'ipotesi zero non può essere rigettata, cioè non vi sono differenze stagionali tra i vari siti. Diversa è la situazione per il 1998, dove R (0,37) si colloca all'estremità destra della distribuzione dei valori ottenuta mediante permutazioni casuali, e quindi  $H_0$  può essere rigettata con  $p < 0,01$ . L'analisi dei confronti a coppie dimostra che, mentre per il 1993 i confronti tra le varie stagioni non sono significativi, nel 1998 sono tutti significativi tranne che per la coppia inverno/primavera.

Dal punto di vista funzionale (Fig. 5) nel 1993 nella stazione 1 dominano la comunità i grazers (GR) e i sub surface deposit feeders (SSDF); nel 1998 invece la comunità sembra più differenziata soprattutto nel periodo autunnale, probabilmente perché in questa stagione maggiormente si risente del rimescolamento delle acque. Durante quest'anno di prelievi si è registrato, inoltre, un considerevole aumento della percentuale dei suspension feeders (SF) rispetto al 1993, probabilmente dovuto all'ingresso di una quantità maggiore di particolato favorito dalla apertura della seconda bocca a mare.

Nella stazione 2 non è possibile evidenziare il medesimo incremento nella differenziazione della struttura funzionale della comunità nel 1998 rispetto al 1993, mentre aumentano in modo marcato, soprattutto nel periodo estivo, i suspension feeders (SF), così come registrato nella stazione 1. Anche nella stazione 3 si nota un incremento del gruppo funzionale dei suspension feeders (SF) nel 1998 rispetto al 1993 pur mantenendo una certa importanza il gruppo dei surface deposit feeders (SDF).

In questa stazione la comparsa in quantità abbondanti della macroalga *Cladophora* non è accompagnata dall'aumento del gruppo dei grazers (GR), naturali utilizzatori di questa fonte nutrizionale.

In questa stazione la comparsa in quantità abbondanti della macroalga *Cladophora* non è accompagnata dall'aumento del gruppo dei grazers (GR), naturali utilizzatori di questa fonte nutrizionale.

In questa stazione la comparsa in quantità abbondanti della macroalga *Cladophora* non è accompagnata dall'aumento del gruppo dei grazers (GR), naturali utilizzatori di questa fonte nutrizionale.

## Conclusioni

La evoluzione morfologica dello scanno in parte naturale, in parte dovuta alle modificazioni indotte dall'uomo, ha determinato

- un considerevole aumento dell'ampiezza del taglio su di esso effettuato nei primi anni '90;
- un restringimento della vecchia bocca a mare verso Volano.

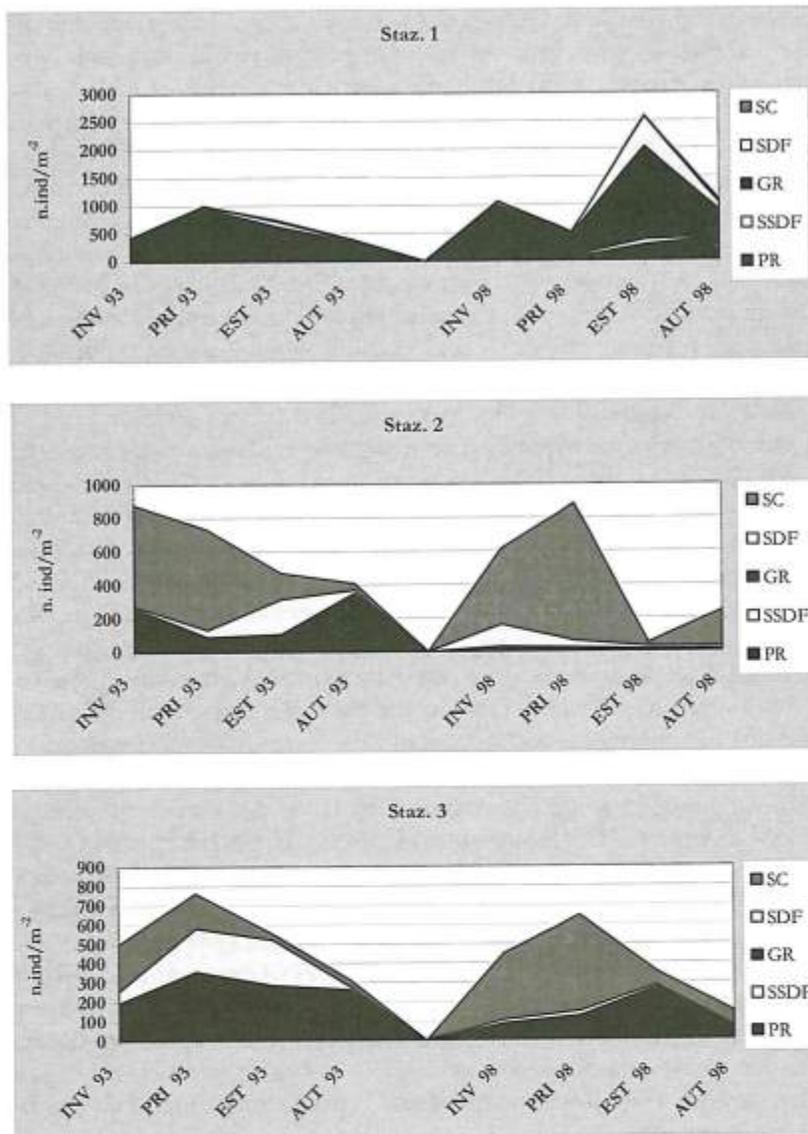


Figura 5 - Composizione in gruppi trofici delle comunità macrozoobentoniche nelle tre stazioni della Sacca di Goro.

Tale situazione ha senza dubbio modificato l'originale idrodinamismo della laguna ma questo non ha eliminato gli eventi anossici che hanno caratterizzato e tuttora caratterizzano la parte orientale della Sacca di Goro. La nuova apertura, che per la sua attuale estensione si può considerare alla stregua di una nuova bocca a mare, ha determinato modificazioni dirette ed indirette connesse alle variazioni idrodinamiche, fra queste le più importanti sembrano essere.

1. l'affermarsi della macroalga pleustofitica *Cladophora*, precedentemente solo sporadica nella Sacca;
2. l'affermarsi di un bivalve esotico, *Musculista senhousia* che in precedenza era presente con densità talmente basse da essere irrilevante con le consuete metodologie di campionamento;
3. la perdita della peculiarità delle varie zone della Sacca, che risultano influenzate, relativamente ai parametri abiotici e alla struttura delle comunità macrobentoniche, non tanto da caratteristiche intrinseche legate alla localizzazione nella laguna, quanto dagli eventi stagionali.

Per quanto riguarda l'affermarsi della Cloroficea *Cladophora* questo può essere dovuto alle caratteristiche intrinseche dell'alga. E' stato infatti evidenziato che in casi di incipiente eutrofizzazione il primo genere che prende il sopravvento sulle altre macroalghe pleustofite è *Ulva*, solo in tempi successivi questo è soppiantato dal genere *Cladophora* (Wallentinus, 1985) che risulta più fortemente nitrofilo (Thybo-Christesen e Blackbum, 1993) del già nitrofilo genere *Ulva* (Viaroli et al., 1993) e competitivamente avvantaggiato dalla presenza di quantità consistenti di nutrienti sia nei confronti di *Ulva* (Pihl et al., 1996) che nei confronti di *Gracilaria* (Peckol et al., 1994). Questo è probabilmente avvenuto nella parte orientale della Sacca di Goro quando ai già ingenti apporti dal Po di Goro (Chiaudani e Marchetti, 1984) si sono sommati gli apporti dal mare aperto, anch'esso ricco in nutrienti (Fonda Umani et al., 1992), con il quale sono assicurati gli scambi dalla nuova apertura. Il bivalve *Musculista senhousia*, relativamente di recente ha notevolmente ampliato il proprio areale di diffusione raggiungendo da una parte il nord America (costa occidentale, Kincaid 1947; costa orientale, Carlton e Geller 1993) dall'altra il Mar Mediterraneo (Hoenselaar e Hoenselaar, 1989).

La specie risulta essere invasiva e competitore avvantaggiato in quanto modifica la tessitura del substrato mediante le emissioni di filamenti di bisso che rendono inaccessibile il sedimento al settling di altre specie di bivalvi. In genere il successo delle specie invasive viene contrastato dalla disponibilità nutrizionale, infatti l'ingresso in un ambiente di un ulteriore consumatore riduce l'abbondanza totale delle risorse disponibili per ogni singola specie (Abrams, 1996), nel caso della Sacca di Goro invece l'apertura della nuova bocca a mare e l'ingresso, attraverso questa, di acque ricche in nutrienti, oltre che la presenza di quantità di materiale organico particolato derivante dalla decomposizione dei letti macroalgali di *Cladophora*, hanno sostenuto in termini nutrizionali la specie invasiva e ne hanno consentito lo stabile insediamento nell'ecosistema. L'incremento del materiale organico particolato è testimoniato indirettamente dall'incremento nel 1998 dell'importanza della categoria funzionale degli scrapers per quanto riguarda le comunità macrobentoniche, infatti tale gruppo funzionale si nutre prevalentemente di epifiti che risultano influenzati positivamente dalla disponibilità di nutrienti (Danovaro e Fabiano, 1995; Jernakoff et al., 1996). Anche l'aumento in termini percentuali dei suspensions feeders nelle comunità associate al sedimento nudo indica una maggiore disponibilità nutrizionale nel 1998, questo gruppo funzionale infatti è direttamente influenzato dalla quantità di particolato sospeso nella colonna d'acqua in quanto fonte trofica principale.

Infine è stato possibile evidenziare nel 1998 una marcata omogeneizzazione delle comunità macrobentoniche infatti mentre le passato era marcato l'effetto stazione, nel 1998 risulta preponderante nella strutturazione delle comunità l'effetto stagione, in altri termini si perdono le caratteristiche peculiari delle varie zone della Sacca (Colombo et al., 1994) a vantaggio di una risposta precisa alla variabilità stagionale, risposta che risulta molto simile, come dimostrato dalla analisi multivariata (MDS) per tutte e tre le stazioni.

## Bibliografia

- Abrams P.A. (1996) - *Evolution and the consequences of species introductions and deletions*. Ecology 77: 1321-1328.
- Canfield D.E., Jorgensen B.B., Fossing H., Glud R., Gundersen J., Ramsing N.B., Thamdrup B., Hansen J.W., Nielsen L.P. and Hall P.O.J. (1993) - *Pathways carbon oxidation in three continental margin sediments*. Mar. Geol. 113: 27-40.
- Carlton J.T. and Geller J.B. (1993) - *Ecological roulette: The global transport of non-indigenous species*. Science 261: 78-82.
- Clarke K. R. (1993) - *Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure*. Aust. J. Ecol. 18, 117-143.
- Chiaudani G. and Marchetti R. (1984) - *Po River*. In: Ecology of European rivers. pp. 401-436. A cura di B.A. Whitton. Blackwell Sc. Publ.
- Chuang S.H. (1961) - *On Malayan shores*. Muwu Shosa, Singapore.
- Colombo G., Bisceglie R., Zaccaria V. e Gaiani V. (1994) - *Variazioni spaziali e temporali delle caratteri-*

- stiche chimico-fisiche delle acque e della biomassa fitoplanctonica della Sacca di Goro* In: Sacca di Goro. Uno studio integrato sull'ecologia. 2° anno di ricerche. pp. 9-82. A cura di S. Bencivelli, N. Castaldi, D. Finessi. FrancoAngeli Ed.
- Crooks J.A. (1996) - *The population ecology of an exotic mussel, Musculista senhousia, in a southern California bay*. Estuaries 19: 42-50
- Danovaro R. and Fabiano M. (1995). *Seasonal and inter-annual variation of bacteria in a seagrass bed of the Mediterranean Sea: relationship with labile organic compounds and other environmental factors* Aquat. microb. Ecol. 9: 17-26.
- Diaz R.J. and Rosenberg R. (1995) - *Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna*. Ocean. and Mar. Biol.: an Annual Review 33: 245-303.
- Fonda-Umani S., Franco P., Ghirardelli E. and Malej A. (1992) - *Outline of oceanography and the plankton of the Adriatic Sea*. In Marine Eutrophication and Population dynamics. pp. 347-366. A cura di G. Colombo, I. Ferrari, V. Ceccherelli, and Rossi R. Olsen & Olsen.
- Hoenselaar H.J. and Hoenselaar J. (1989) - *Musculista senhousia in the western Mediterranean*. Basteria 53: 73-76.
- Jernakoff P., Brearley A. and Nielsen J. (1996) - *Factors affecting grazers-epiphyte interactions in temperate seagrass meadows*. Ocean. and Mar. Biology: an Annual Review 34: 10-162.
- Kincaid T. (1947) - *The acclimatisation of marine animals in Pacific north-western waters*. Mar. Council. Cl. of South. Calif. 72: 1-3.
- Pambianchi P. (1987). *Sacca di Goro: inquadramento morfologico-deposizionale finalizzato allo studio del ruolo dei sedimenti nei processi di eutrofizzazione*. Univ. Di Ferrara Tesi di laurea inedita.
- Pearson T.H. and Rosenberg R. (1978) - *Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment*. Ocean. and Mar. Biol.: an Annual Review 16: 229-311.
- Peckol P., DeMeo-Anderson B., Rivers J., Valiela I., Maldonado M. and Yates J. (1994) - *Growth, nutrient uptake capacities and tissues constituents of the macroalgae Cladophora vagabunda and Gracilaria tikvahiae related to site-specific nitrogen loading rates*. Marine Biology 124: 175-185.
- Pihl L., Magnusson G., Isaksson I. and Wallentinus I. (1996) - *Distribution and growth dynamics of ephemeral macroalgae in shallow bays on the Swedish west coast*. J. Sea Res. 35: 169-180.
- Raffaelli D.G., Raven J.A. and Poole L.J. (1998) - *Ecological impact of green macroalgal blooms*. Ocean. and Mar. Biol.: an Annual Review 36: 97-125.
- Schramm W. and Nienhuis P.H. (eds.) (1996) - *Marine benthic vegetation: recent changes and the effects of eutrophication*. Springer, Berlin, 463 pp.
- Thybo-Christesen M. and Blackburn T.H. (1993) - *Internal N-cycling, measured by  $^{15}\text{NH}_4^+$  dilution, in Cladophora sericea in a shallow Danish bay*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 100: 283-286
- Turolla E. (1999) - *Nuovi ospiti per la Sacca di Goro*. Laguna 4: 23-28.
- Viaroli P., Naldi M., Christian R.R. and Fumagalli I. (1993) - *The role of macroalgae and detritus in nutrient cycles in a shallow-water dystrophic lagoon*. Verh. Internat. Verein. Limnol. 25:1048-1051
- Wallentinus I. (1984) - *Comparison of nutrient uptake rates for Baltic macroalgae with different thallus morphologies*. Mar. Biol. 80: 215-225.

Manoscritto ricevuto il 10/12/1999, accettato il 26/3/2000.

## L'ambiente della Sacca di Goro: suo inserimento nel Parco del Delta e sue problematiche ambientali

Gaetano Mazzeo

Via Battisti 134/A - 44020 Goro (FE)

### Riassunto

L'evoluzione del Po di Goro porta l'uomo a stabilirsi nella sua zona più strategica: la Sacca di Goro. Qui si sviluppa l'ambiente umano, che all'inizio sfrutta economicamente la produttività dell'ambiente naturale e successivamente ne modifica la struttura per gestirne il territorio. La sacca di Goro è in competizione con l'uomo per stabilire la priorità di interventi, probabilmente con l'istituzione del Parco del Delta si otterrà una mediazione tra ambiente, pesca e turismo.

### La Sacca di Goro prima del Paese

L'inizio e la causa di tutto si rifà al Taglio di Porto Viro (1604), da cui parte l'evoluzione attuale dell'area inferiore del Delta del Po. Con lo spostamento verso sud del corso del Po da parte dei Veneziani, incomincia la sedimentazione e stabilizzazione di tutta quell'area che dai cordoni dunosi, identificabili nell'attuale corso della Strada Romea, va al mare. Nei primi anni del XVIII secolo, il Po di Goro che sfociava in Adriatico nell'attuale Porto di Goro, attraverso un corso riconducibile a quello che nel paese stesso è l'allineamento Po morto - Via Risanamento - Piazzale del Porto vecchio, cambia alveo stabilendosi in quello attuale ed edificando le Valli Bonello, Vallazza e Vallesina, raggiunge il sito attuale del paese di Gorino. Alla fine del XIX secolo la bocca del Po di Goro, avanzando, si attesta all'altezza della Lanterna vecchia e via via fino all'inizio dei successivi anni '50 crea il suo apparato di scarico in mare con lo Scanno e l'Isola dell'amore, che col tempo si congiungeranno fino alla situazione attuale di quasi totale chiusura del tratto di mare verso Sud, unica apertura della laguna detta Sacca di Goro (Fig. 1).

La Sacca confina a nord col Po di Goro e le Valli bonificate, ad est e a sud separata dallo Scannone, con il Mare Adriatico, ad ovest con la bocca del Po di Volano (da cui è separata dalla spiaggia di Volano), il Boscone della Mesola, la bocca del Canal Bianco e le altre valli bonificate: complessivamente circa 2600 ettari di laguna con ambienti diversificati, da quello marino a quello fluviale, con tutte le situazioni intermedie e variabili saline.

Per questa sua peculiarità, la Sacca di Goro crea le condizioni perché vi si stabilizzi inizialmente una comunità peschereccia che, nonostante le miserevoli condizioni sociali, sopravvive e prospera per la ricca pescosità delle acque lagunari, ma anche per ulteriori attività economiche collegate con questo ecosistema.

La raccolta della canna, delle alghe, la caccia all'avifauna acquatica, hanno permesso di supplire a carenze altrimenti non superabili. La malaria, il tifo, lo scorbuto hanno decimato la popolazione delizia, ciò nonostante l'apparato urbano si è allargato, la socialità è aumentata e col tempo è migliorata la qualità della vita.



Figura 1 - Bocca del Po di Goro e Faro vista da SO all'inizio degli anni '70.

### L'ambiente antropico

I Goresi si sono sempre distinti per la loro abilità di pescatori ma anche di conduttori di valli da pesca, al punto tale che la pesca del novellame per il ripopolamento vallivo è quasi esclusiva prerogativa dei Goresi che oramai in pochi percorrono le coste italiane all'inizio della primavera e riescono a riconoscere gli avannotti nelle loro multiformi specie .... a occhio.

I Goresi, padroni dell'ambiente, sviluppano la "batana", barca da pesca tipica e adatta alla navigazione nei bassi fondali, a chiglia piatta, dapprima a vela e poi a motore.

Nel primo decennio degli anni '50 del secolo appena trascorso, a seguito di un inteso fenomeno di subsidenza, in minima parte determinata dalla costipazione delle argille e degli strati torbosi ma soprattutto a causa delle estrazioni metanifere nell'area padana e polesana in particolare, tutto l'areale goresi si abbassa rispetto al medio mare fino agli attuali circa - 250 cm s.l.m.

Nel 1958 il paese subisce un'alluvione marina a seguito dello scavalciamento dello Scannone, già a quel tempo difesa naturale della Sacca e di tutto il territorio bonificato.

Gli argini all'epoca erano quasi irriversi, sia a Po che a mare, ma il paese fino a quel momento non aveva mai subito ingressioni; a quella data inizia la rinascita del Paese. Si ergono nuove e più massicce arginature, cresce il numero delle idrovore, l'ente di riforma decide di formare una difesa litoranea che partendo dalla bocca del Po di Goro arrivi a Porto Garibaldi (Fig. 2).

In questa ottica dopo le alluvioni del 1966 si stabilizza lo scanno di Goro con tubi Longard e l'arginatura a mare la si innalza più volte fino alla quota attuale di 14,50 m s.l.m.. Successivamente si ingrandisce il Porto di Goro, allargandolo nel lato est: l'economia peschereccia di Goro giunge a livello nazionale e le attenzioni rivolte alla sua economia e ambiente (ormai in simbiosi) sono di tutto riguardo.

Il fatto che l'economia goresi si sia basata sempre ed essenzialmente nel prelievo naturale, ha fatto sì che il territorio e l'ambiente lagunare non fossero mai deturpati ed impoveriti qualitativamente.

Il mercato ittico di Goro è sempre stato rinomato per le qualità pregiate di specie ittiche qui vendute. La bonifica e successiva assegnazione dei terreni non ha mai comportato un calo del numero degli addetti alla pesca ed addirittura all'inizio degli anni '80, l'introduzione in Sacca della vongola filippina (*Tapes philippinarum*) ha fatto sì che l'economia peschereccia decollasse così sorprendentemente che chi aveva già affrancato i propri terreni di assegnatario (30 anni di conduzione) li alienò ritornando al settore pesca e riconducendo il paese alla monocultura. A questo punto si è fatta una scelta produttiva che è stata anche ambientale: la Sacca doveva diventare una fabbrica di vongole.



Figura 2 - Il Paese di Goro nel 1971, tra il porto e il Po. E' evidente come lo sviluppo del Paese segua l'antico dosso, originatosi come barra di foce.

La produttività è diventata quasi miracolosa, ma la richiesta di sempre maggior quantità di molluschi, ha messo in crisi il delicato equilibrio dell'ambiente Sacca.

Dopo neppure 10 anni lo Scannone viene tagliato dalla furia dell'insoddisfazione per la generale proliferazione algale e conseguente anossia della Sacca che porta massiccia moria a tutti i livelli di vita della laguna. Cento metri di falla che sembravano la soluzione a tanti mali, ma a distanza di tempo i mali non sono diminuiti e l'imbocco del "taglio" è già arrivato a poco meno di 1500 m., intaccando le difese naturali. All'inizio qualsiasi richiesta di intervento sulla Sacca veniva accettato come placebo per quietare il moto popolare, successivamente si intervenne con metodologie scientifiche ma purtroppo non si ottennero i risultati sperati. Tante colpe, nessuna soluzione e così a cadenza annuale si ripetono fenomeni anossici e lavori ambientali di escavo di canali, di chiusure di bocche a Po, di tagli più o meno controllati sullo Scanno, di edificazione di barene artificiali: di certo si è arrivati ad un impoverimento di acqua dolce e ad una inesorabile salinificazione della Sacca e della Valle di Gorino.

La massa biologica è cresciuta a dismisura, si sono sacrificate molte specie di molluschi, crostacei e ittiche per aumentare l'area disponibile alle vongole; il rimaneggiamento continuo dei fondali, raschiando i quali si raccolgono i molluschi, ha impoverito i bassi fondali e ci si è dimenticato che qualche tempo prima tutte quelle alghe, quella canna, quei pochi centimetri di mare erano la vita biologica della laguna ed economica dei Goresi.

L'uomo "vallante", come ha imparato nella millenaria attività dei suoi predecessori vallicoltori, ha teso a mantenere giovane l'ambiente, a frenarne l'evoluzione evitando la solidificazione del territorio vallivo - lagunare; ecco quindi l'intervento continuo, la movimentazione ovunque necessari per mantenere l'ambiente per il prodotto. Oggi forse si è persa questa mira e non si intravede più che un ambiente bello è anche produttivo, l'inverso non lo è quasi mai ed il paesaggio ne consegue.

E' bastato il deterioramento dell'equilibrio delle svariate condizioni della Sacca che si verificasse l'anossia da alghe, il fenomeno della mucillagine, le morie da inquinamento.

A questo punto ci si accorge che l'economia del paese intero è minacciata, che (anche se nessuno lo dice, però lo si fa) chi deve sacrificarsi è l'ambiente e quanto è stato fatto è di questi giorni. Si sono scavati canali, si sono trasformate intere aree, si è irrigidito il sistema idraulico, si sono asportati milioni di metri cubi di fondale, si è impoverito lo scambio Po - Mare all'interno della laguna favorendo al di là del cordone litoraneo, si sono innescati fenomeni erosivi e di deposito forse non previsti, si è garantita la remunerazione degli addetti ai lavori - C'è chi ha detto: "con i soldi spesi per Goro, si sarebbe ricostruito un paese nuovo più in là al sicuro ...!". Esagerato, ma da riflettere!

### L'ambiente naturale

Detto ciò non si pensi che l'ambiente sia stato saccheggiato al punto di non ritorno.

Nel frattempo di quanto descritto prima si sono formate coscienze ecologiche che hanno portato alla tutela di questo patrimonio ambientale e qui sono state istituite oasi naturalistiche e per ultimo il Parco Regionale del Delta del Po che ingloba tutto il territorio comunale di Goro, tutelandolo variamente dalla zona A (protezione integrale) alla B, C e pre-parco, assecondando le vocazioni ambientali o antropiche. La Sacca di Goro, come tutti i delta, è una zona ricchissima di diversità biologica; è un divenire continuo nelle sue trasformazioni territoriali che se l'uomo non assuefacesse ai propri desideri produttivi sarebbe già da tempo un lago costiero, un tombolo, una valle da pesca.

I fondali della Sacca hanno una profondità media di 60 - 80 cm. aumentando solamente negli avvallamenti che dividono le barre costiere sommerse, pertanto la navigazione è costretta lungo sequele di "bricole" (pali segna via) in canali continuamente scavati, pena l'insabbiamento e l'occlusione degli stessi. La scarsa profondità ha altresì favorito una delle più tipiche attività economiche della zona: la mitilicoltura, praticata su impianti fissi con reste penzolanti e sommerse.

Le parti orientali della Sacca sono note con il nome di Valli di Gorino e qui agli inizi del secolo era praticata la risicoltura, come si può ben evidenziare nella restituzione foto aerea dal diffuso reticolo dei canali. Qui il paesaggio è più verde, infittito dal canneto e lascia ben intuire la sistemazione di pre-subsidenza. La Sacca di Goro e le Valli di Gorino costituiscono l'unico lembo in terra emiliana del "delta vivo", quel particolare ambiente solitario e orizzontale e in continuo mutamento che attualmente ritroviamo solo più a nord, in territorio veneto.



Figura 3 - Coppia di Fraticelli sul nido intenti nel rituale dello scambio dell'imbeccata.

Si tratta perciò di ecosistemi del massimo interesse, collegati geograficamente ai contigui Boscone della Mesola e foce del Po di Volano; tale diversità naturalistica in uno spazio ridotto eleva l'importanza ambientale della Sacca ad un livello che trascende l'ambito regionale. Per tale motivo sono stati preventivamente istituiti una serie di vincoli volti a salvaguardare l'integrità dell'area: l'intera Sacca è coperta da vincolo paesaggistico; sull'isola dello Scannone a partire dal faro e fino alla sua punta alla bocca della Sacca insiste una riserva naturale dello stato estesa su 480 ha; nella zona del Mezzanino, è stata istituita un'oasi di protezione della fauna di 250 ha, tutto ciò a tutela dei ricchi popolamenti animali che vi trovano rifugio e habitat riproduttivo.

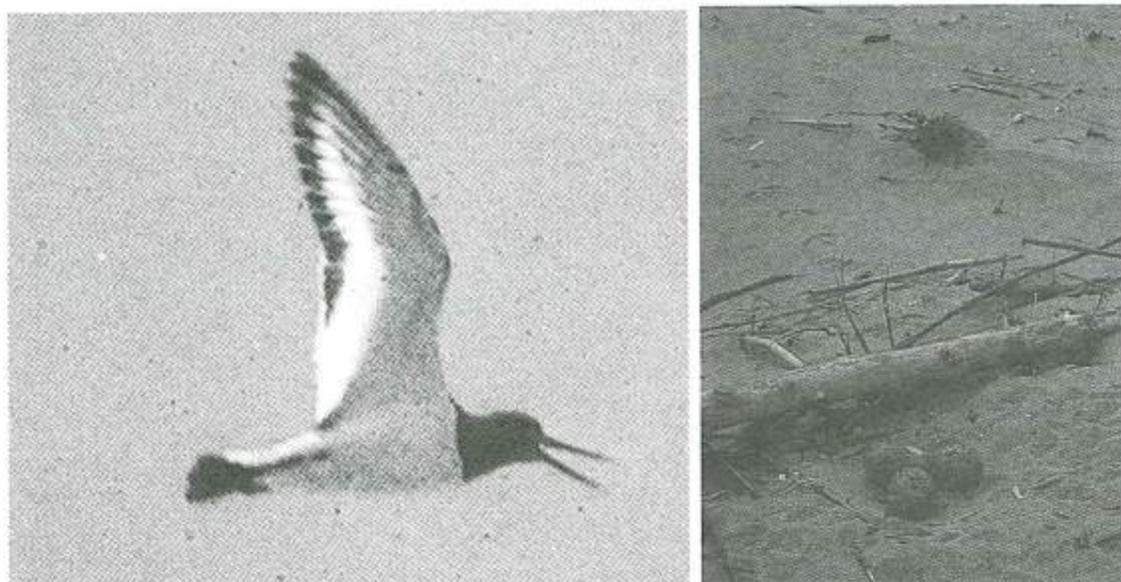


Figura 4 - Beccaccia di mare ed il suo nido a terra con evidenti le uova e le orme. L'uccello non si alza mai in volo dal nido per evitarne l'individuazione.

In particolare qui i dossi si presentano sabbiosi verso il mare e limosi dalla parte rivolta alla valle, la vegetazione è di conseguenza alquanto dissimile sui due fronti; l'elevata instabilità di tale ambiente non ha consentito però l'instaurarsi di una caratteristica successione di fasce vegetazionali.

Le specie ornitiche stanziali e nidificanti sulla spiaggia sono il Gabbiano reale (*Larus argentatus*) e comune (*Larus ridibundus*); più interessante è però la nidificazione di specie estivanti come la Rondine di mare (*Sterna hirundo*), il Fraticello (*S. albifrons*) (Fig. 3), il Frattino (*Charadrius alexandrinus*), il Gabbiano corallino (*Larus melanocephalus*) il Beccapesci (*Sterna sandvicensis*) e soprattutto la Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus*) (Fig. 4), per la quale questi scanni rappresentano i pochi luoghi di riproduzione in Italia. Estivanti o di passo sono invece la Sterna zampanere (*Gelochelidon nilotica*), il Gabbianello (*Larus minutus*), la Sterna maggiore (*Sterna caspia*), la Sterna del Dougall (*Sterna dougalli*): rari e qualificanti per l'ambiente.

Interessanti per la rarità o per il gran numero o perché nidificanti in aree confinanti sono il Cormorano (*Phalacrocorax carbo*), la Garzetta (*Egretta garzetta*), l'Airone rosso (*Ardea purpurea*), l'Airone cinerino (*Ardea cinerea*), l'Airone bianco maggiore (*Egretta Alba*), l'Airone guardabuoi (*Bubulcus ibis*), la Spatola (*Platalea leucorodia*), il Fenicottero (*Phoenicopterus ruber*).

Rinvenibili in acqua invece lo Svasso maggiore (*Podiceps cristatus*), lo Svasso piccolo (*Podiceps nigricollis*), il Tuffetto (*Tachybaptus ruficollis*) ed una miriade di Anatidi.

In poche parole se si dovesse star qui ad elencare le specie di uccelli là osservabili di passo, stanziali, comuni o rare ci vorrebbe l'intero elenco degli uccelli del paleartico occidentale e non si è detto dei piccoli uccelli che vivificano il fragmiteto, il giuncheto, le zone ripariali, la pineta, il lecceto, le aree agricole e dei rapaci, questi splendidi animali cui farei grande torto se non citassi almeno il Falco di palude (*Circus aeruginosus*) e l'Albanella reale (*Circus cyaneus*).

Sempre più frequente e di gran numero è la presenza della Testuggine marina (*Caretta caretta*) (Fig. 5); purtroppo scomparsa è invece la Lontra (*Lutra lutra*): un po' per la modificazione e presenza antropica nei suoi ambienti sempre più ristretti, un po' per la pesca a imbrocco sempre più diffusa e per lei micidiale.

Sotto l'acqua oltre a moltissimi crostacei e molluschi la Sacca ospita una ricca ittiofauna rappresentata da Anguille (*Anguilla anguilla*), Cefali (*Mugil sp.pl.*), Orate (*Sparus auratus*), Branzini (*Dicentrarchus labrax*), Sogliole (*Solea sp. pl.*), Ghiozzi (*Gobius sp.pl.*), i più diffusi.



Figura 5 - Testuggine di mare, numerosa in tutto l'areale della Sacca, nonostante il disturbo antropico che ne impedisce però la sosta.

La vegetazione acquatica va dalla canna (*Phragmites communis*) all'alga rossa *Gracilaria confervoides* e dalla verde *Ulva rigida* alla *Ruppia maritima*; sullo Scanno è stato impiantato con funzione frangivento e stabilizzante della duna l'Olivello spinoso (*Hippobas rhamnoides*) e il Tamerice (*Tamarix gallica*) di lato fanno frangia i giunchi alofili (*J. maritimus* e *J. litoralis*) e nei prati barenicoli la *Salicornia fruticosa* e *S. herbacea*, il Limonio (*Limonium vulgare*) gli Astri o Settembrini (*Aster tripolium*).

L'impianto industriale (escludendo i piccoli impianti locali) vero e proprio più vicino è la Centrale ENEL di Polesine Camerini (25 Km.), per il resto l'inquinante che minaccia l'area proviene quasi totalmente dal Po e dagli sbocchi vicini alla Sacca, ciò nonostante la situazione è quasi di privilegio considerando che chi ne soffre di più è "solo" l'impianto di molluschicoltura inserito a forza nella Sacca e quindi più soggetto alle variabili chimico-fisiche.

Tutto l'apparato floro-faunistico qui esistente tende a superare positivamente le crisi che derivano soprattutto dalle alte temperature estive e comunque la selezione evolutiva si mantiene egregiamente nei limiti climatici. Ogni tanto si avverte la presenza invadente di molluschi, pesci, mammiferi alloctoni che si inseriscono in nicchie libere o rese tali: il più delle volte sono allarmi autoricondotti alla normalità, di altre, come per esempio la Nutria (*Myocastor coypus*) neppure con l'intervento antropico se ne intravede la soluzione.

### Il Parco

Ciò detto la Sacca di recente è entrata a far parte dell'area del Parco Delta del Po, la stazione n. 1 Volano - Mesola - Goro. Come recita un opuscolo del Parco: "è la parte più a nord del Parco, dominata dalla presenza del fiume. da una parte il Po di Goro, che lambisce Mesola e arriva al mare determinando la suggestiva Sacca di Goro, dall'altra il Po di Volano, che giunge nell'Adriatico, lasciandosi alle spalle il gran Bosco della Mesola, pinete e oasi vallive".



Figura 6 - Gabbiano corallino e Beccapesci in competizione nell'area di nidificazione.

La popolazione locale non se ne sarebbe mai accorta del Parco regionale, se non forse per le tabelle indicative. Qui il Parco "naturale" è sempre esistito. Le condizioni ambientali sono sempre state limitanti, però a favore delle attività umane. Il lavoratore della Sacca, in fondo è un raccoglitore.

Prima il pesce in mare, poi la canna in valle, poi le alghe, poi il novellame, ora i molluschi. Non ha mai seminato per avere, ha solo cercato di capire e conoscere i ritmi naturali. Ora con i molluschi, reddito primario, l'uomo di Goro impara a seminare, chiede di essere protetto, pretende e difficilmente accetta il Parco.

A fatica sopporta il turismo, perché non ne vede una economia di massa e lo intende come un disturbo, un futuro concorrente. Nello stesso tempo la zona della Sacca è l'unica ancora dove la Natura vede e provvede. Il resto del Parco sono zone a macchia di leopardo; la Sacca è un'area omogenea che ben si integra nell'articolato umano anche se questo ne impone e determina morfologia e destinazione.

Il Parco potrebbe diventare l'ultima sponda per garantire un ambiente più naturale, più sano, più vivibile, più garantito: se così fosse veramente i problemi si risolverebbero con meno interventi e meno spese. Il Delta vivo è qui, è già fatto, con l'uomo.

### Bibliografia

- Pesarini F. (1985) - *Itinerari naturalistici nel Ferrarese*. Civico Museo di Storia Naturale di Ferrara.  
 Maestri D. (1981) - *Goro e il Delta del Po*. Università degli Studi di Roma, Istituto di Fondamenti dell'Architettura: pp. 446.  
 Mazzeo G. (1990) - *Gli uccelli dai monti al mare*. In *Il Po dalle sorgenti al Delta*, a cura di Corbetta F. Guide Verdi - Ed. Maggioli, pp. 85-121.  
 Rea E. (1996) - *Il Po si racconta* - Ed. Il Saggiatore: pp. 286.  
 Vianelli M. (1988) - *A Sud del Delta*. Guide Verdi - Ed. Maggioli: pp. 176.

Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 25/3/2000.

## Norme per gli Autori

**Studi costieri** pubblica articoli scientifici originali in lingua italiana su argomenti relativi alla dinamica e difesa dei litorali ed alla gestione integrata della fascia costiera. Gli articoli scientifici sono sottoposti a revisione da parte di due esperti indicati dal Comitato scientifico.

**Studi costieri** pubblica anche Schede tecniche e Riassunti di tesi di Laurea e di Dottorato di ricerca inerenti gli stessi temi. **Studi costieri** ospita inoltre rapporti sull'attività svolta da Amministrazioni pubbliche in materia di gestione integrata della fascia costiera. Questi ultimi due tipi di contributi sono soggetti solo ad una revisione di tipo redazionale.

Gli Autori degli articoli sono pregati di rispettare le seguenti norme. Gli articoli non redatti in piena conformità con esse non potranno essere presi in considerazione per la pubblicazione.

I manoscritti devono essere inviati in triplice copia con allegate figure e tabelle. Dopo l'accettazione deve essere inviata la copia definitiva su dischetto o per posta elettronica secondo le istruzioni riportate in seguito.

**Titolo** - Massimo 150 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Titolo corrente** - Massimo 80 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Autore/i** - Nome e Cognome per esteso, seguito da un numero in apice per indicare l'eventuale Istituto di appartenenza ed il relativo indirizzo.

**Riassunto** - Non più di 2.000 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Abstract** - Riassunto esteso in lingua inglese di non più di 5.000 caratteri.

**Stile** - Adeguarsi allo stile dei lavori pubblicati su questo numero. Tutti i testi, compreso il titolo generale e quello dei paragrafi, devono essere scritti in Maiuscolo e minuscolo. Non inserire caratteri strani, di formato diverso o sottolineati. Il neretto è utilizzato solo per il titolo dei paragrafi. Eventuali sottoparagrafi possono portare un titolo in corsivo neretto. Non inserire righe bianche nel testo se non alla fine di paragrafi e dei sottoparagrafi.

Evitare il più possibile i rientri e, comunque, farne di un solo ordine. Gli elenchi puntati sono identificati da -, 1) oppure a); ogni elemento dell'elenco è chiuso con ; salvo l'ultimo che chiude con un punto.

**Formule** - Se possibile utilizzare il formato testo; in alternativa l'editore di formule di Word impostando il carattere Garamond corpo 11 chiaro. Utilizzare caratteri in neretto e corsivo solo se imposto dalla nomenclatura internazionale.

**Tabelle** - I caratteri alfabetici/numerici per le tabelle sono in stile Garamond corpo 11. Le Tabelle sono identificate con Tabella n, oppure (Tab. n) se fra parentesi. Devono essere precedute da una didascalia. Non inserire tabelle in forma di immagini.

**Figure (fotografie, schemi, diagrammi)** - Salvo accordi specifici con la Direzione, vengono pubblicate solo figure in bianco e nero. Le Figure sono identificate con Figura n, oppure (Fig. n) se fra parentesi. Devono essere seguite da una didascalia. La larghezza massima a stampa delle figure è 15 cm. Ad eccezione delle figure stampate a giustezza piena, tutte le altre non potranno avere una base superiore a 10 cm. La Redazione è a disposizione per discutere aspetti tecnici relativi a questo punto.

**Note a piè di pagina** - Sono da evitare il più possibile e, se lunghe o numerose, verranno riportate in corpo minore in fondo all'ultima pagina dell'articolo con richiami numerici nel testo. Indicazioni di Progetti e Finanziamenti verranno inserite prima della Bibliografia con gli eventuali Ringraziamenti.

**Riferimenti bibliografici** - Nell'articolo le citazioni sono racchiuse fra ( ) con il seguente formato: (Verdi, 1990) o (Rossi e Verdi, 1989); (Verdi et al, 1987) qualora il numero degli Autori sia maggiore

di due. Se citato nell'ambito di una frase il nome di un Autore (1995) è seguito dall'anno della pubblicazione a cui si fa riferimento.

**Bibliografia** - Tutti e solo i lavori citati nel testo devono comparire in Bibliografia. La Bibliografia deve essere in ordine alfabetico per cognome; es.:

Bianchi A., Rossi V. e Verdi T. (1999) - *Nuovi metodi di difesa dei litorali*. Studi costieri, 19: 153-157. (19 è il numero del fascicolo, 153-157 le pagine).

Neri A. e Rossi C. (1978) - *Elementi di geomorfologia costiera*. Nessuno Ed., Roma. pp.324.

Violi K. (1998) - *Il ripascimento dei litorali in Italia*. Atti XXI Congr. Soc. Ital. Geomorfologia. Bari. pp. 34-76.

Evitare di usare AA.VV., anche se il numero degli Autori è elevato.

**Versione definitiva** - Il file contenente la versione definitiva dell'articolo, in Word per Windows, deve essere inviato dopo la comunicazione di accettazione del manoscritto. Il testo non deve essere giustificato e, fatta eccezione per le formule scritte con l'editore specifico, può essere scritto con qualsiasi carattere. Si suggerisce comunque l'utilizzazione del Garamond: corpo 14 per il titolo, c. 11 per il testo, c. 9 neretto per le didascalie di figure e tabelle.

Le figure (grafici e foto) dovranno costituire una pagina ciascuna. Anch'esse devono essere inserite nel documento .doc. Prima dell'invio della versione definitiva si consiglia di prendere accordi con la Redazione.

**Altre informazioni** - Nella preparazione degli articoli si tenga conto del fatto che una buona impaginazione necessita di un elevato rapporto testo/figure. Anche se gli Autori non devono procedere all'impaginazione dell'articolo, è bene che operino in modo tale da facilitare l'inserimento di ciascuna Figura dopo il rispettivo richiamo. Analogo discorso vale per le Tabelle.

**Estratti:** È prevista la stampa di 100 estratti per ciascun articolo. Agli Autori è richiesto un contributo di Lire 50.000 per pagina pubblicata sulla Rivista.. Gli Autori sono pregati di inviare, insieme alle bozze corrette, le indicazioni necessarie per l'intestazione della nota di debito.

I manoscritti devono essere inviati o alla

**Redazione di Studi costieri**

c/o Dipartimento di Scienze della Terra

Via Jacopo Nardi, 2 - 50132 Firenze

Tel. 055 243486 - Fax 055 241595

E-mail: epranzini@cesit1.unifi.it

o alla

**Segreteria del Comitato scientifico di Studi costieri**

c/o Dipartimento di Ingegneria civile

Via Santa Marta, 4 - 50100 Firenze

Tel. 055 4796224 Fax 055 495333

E-mail aminti@dicea.unifi.it