

Morfodinamica delle bocche lagunari della Sacca di Goro

Umberto Simeoni¹, Giorgio Fontolan² e Paolo Ciavola¹

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

² 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-

capale 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 km², con profondità medie di 1,5 m, e racchiude un volume d'acqua di circa 40 Mm³ (Fig. 1). E' 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 prominentezza 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.

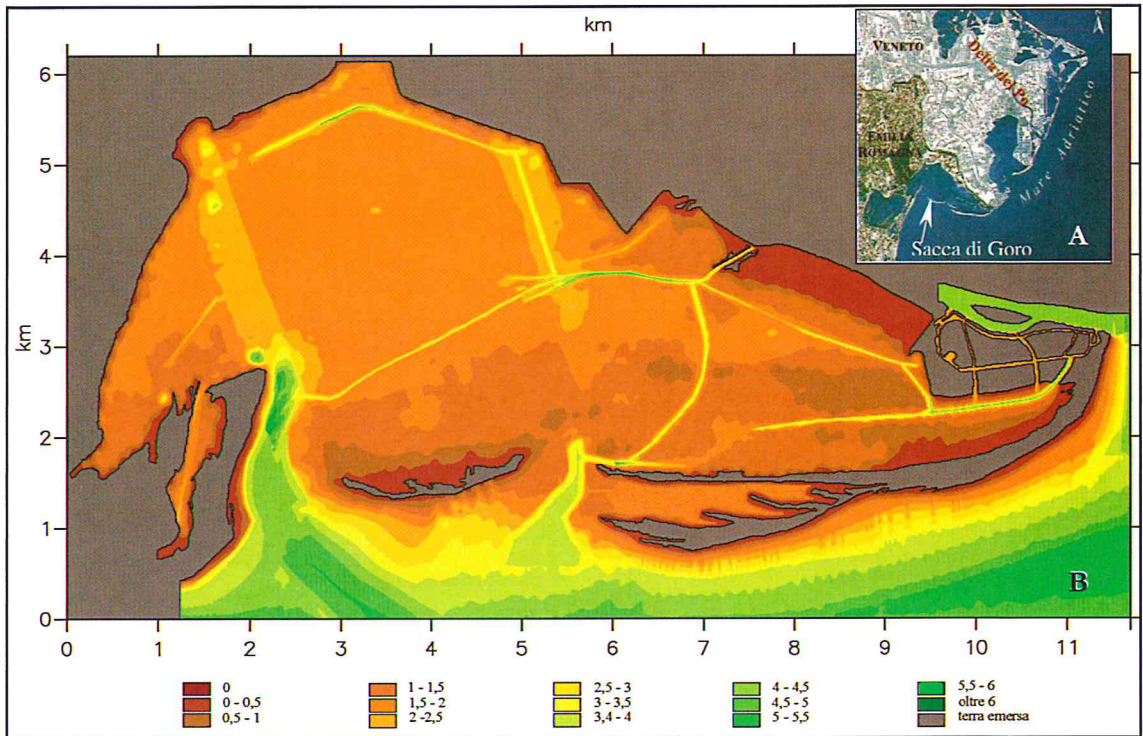


Figura 1 - Localizzazione (A) e batimetria (B) della Sacca di Goro (rilievi del 1999).

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 ($1517 \text{ m}^3/\text{sec}$ di portata media), che però mostrano una tendenza alla riduzione dei valori medi, soprattutto nel periodo 1942-45.

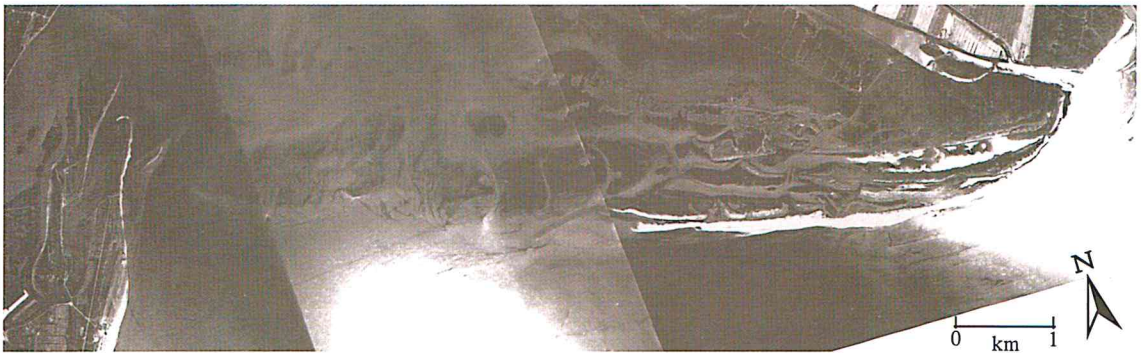


Figura 3 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1955 (particolare dello Scanno di Goro).

Nei sei anni successivi (1950-55) le portate medie calano sensibilmente ($1363 \text{ m}^3/\text{sec}$), anche se nel 1951 vi è da registrare un evento di piena particolarmente intenso ($9000 \text{ m}^3/\text{sec}$). 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 $1542 \text{ m}^3/\text{sec}$) registrato in questo periodo. Tra il 1964 ed il 1970 la riduzione della portata liquida media del Po ($1357 \text{ m}^3/\text{sec}$) 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 ($1577 \text{ m}^3/\text{sec}$), 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 ($2088 \text{ m}^3/\text{sec}$). 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").

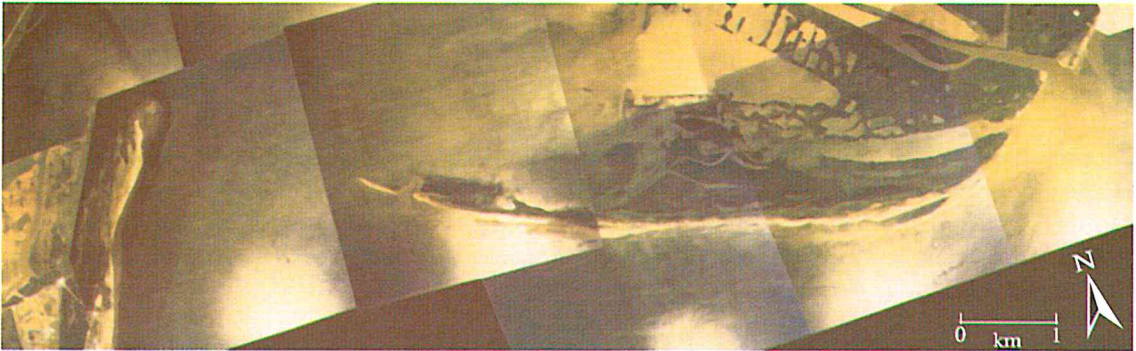


Figura 4 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1977 (particolare dello Scanno di Goro).

Tra il 1977 ed il 1979 perdura la fase regressiva dello Scanno, anche se aumenta la portata liquida media del Po (2088 m³/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 m³/sec) e così pure tra il 1983-89 (1487 m³/sec) fino ad attestarsi attorno ai 1024 m³/sec nel 1991.



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

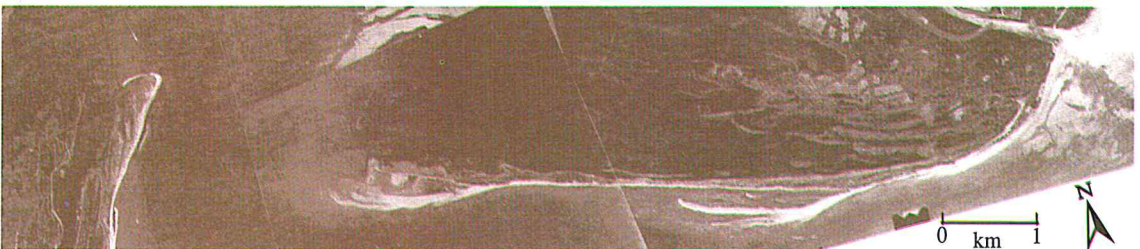


Figura 6 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1986 (particolare dello Scanno di Goro).

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).

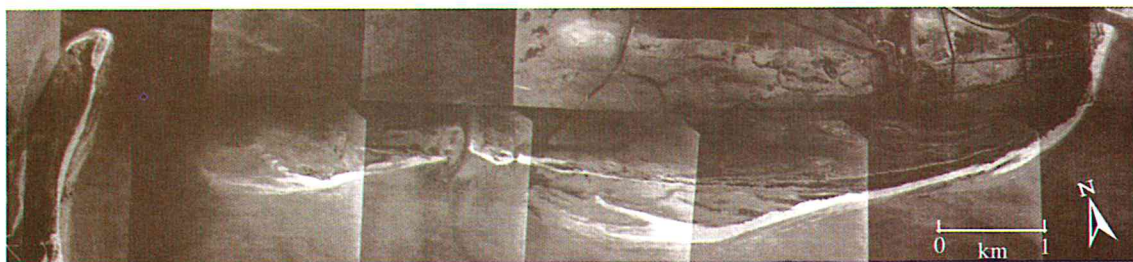


Figura 8 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1993 (particolare dello Scanno di Goro).



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.

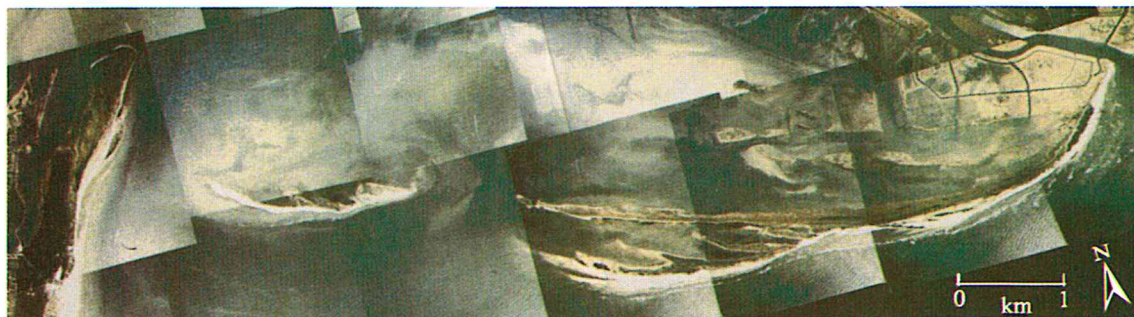


Figura 10 - Fotomosaico del volo effettuato nel 1997 (particolare dello Scanno di Goro).

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 batimetria 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.

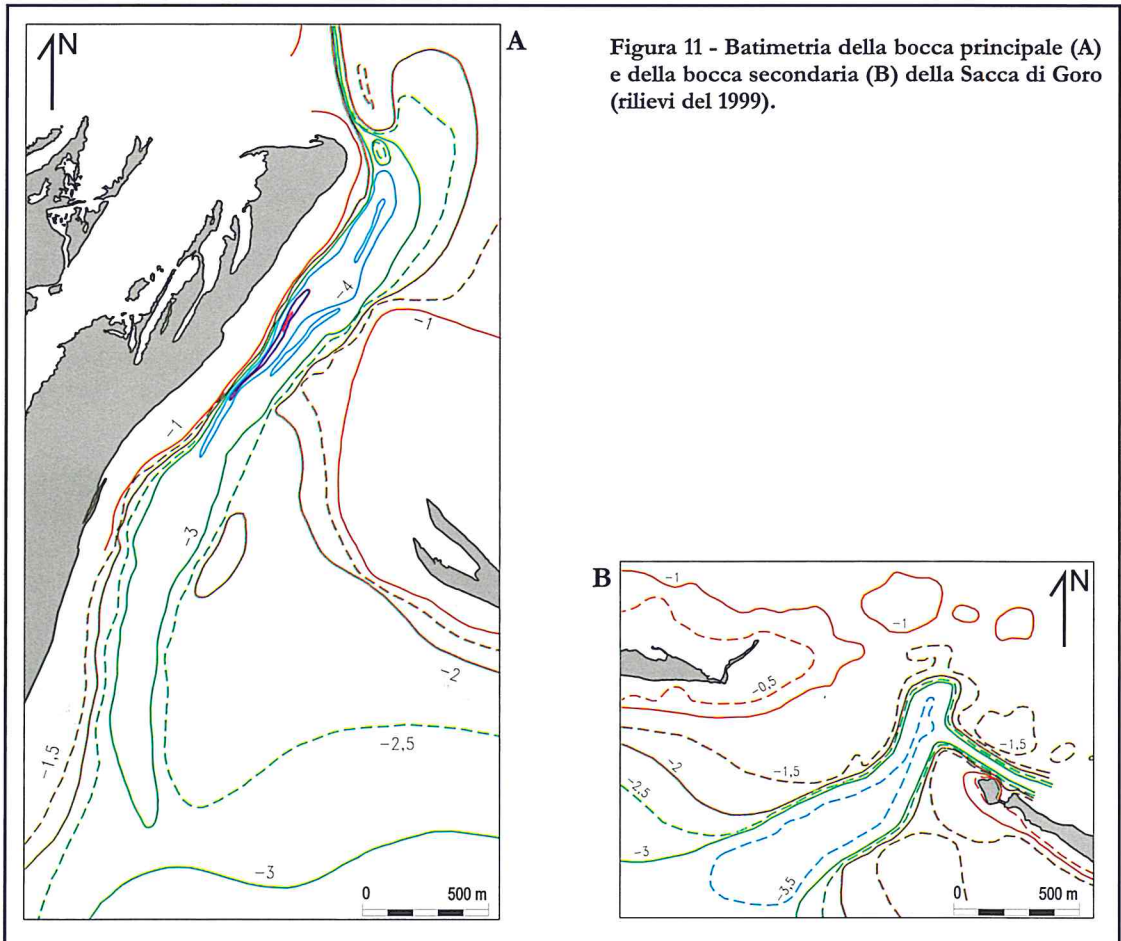


Figura 11 - Batimetria della bocca principale (A) e della bocca secondaria (B) della Sacca di Goro (rilievi del 1999).

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 batimetrica $-2,5$ 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.

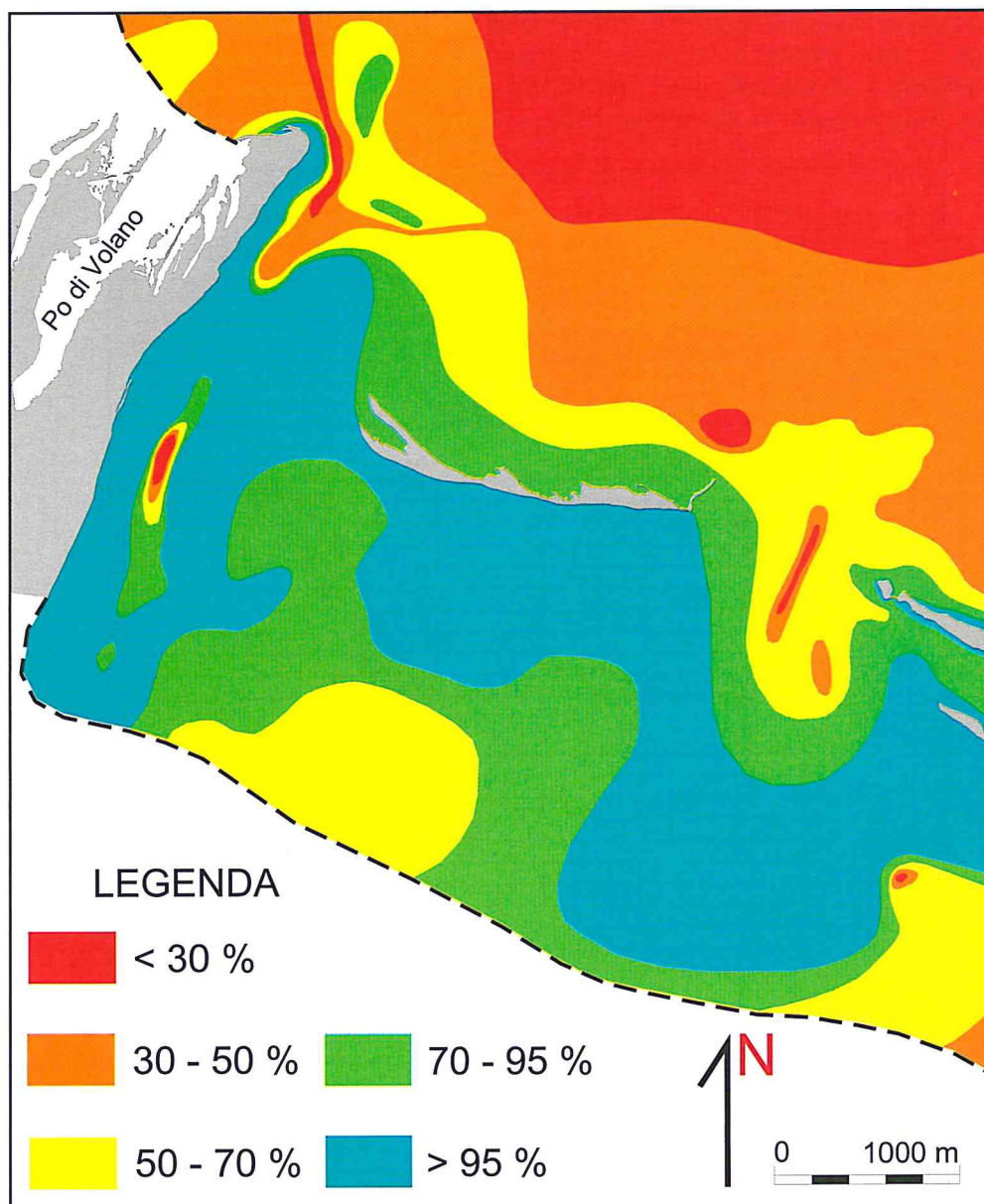


Figura 12 - Distribuzione della percentuale di sabbia sui fondali delle bocche lagunari della Sacca di Goro.

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 redistribuzione laterale, favorendo la sedimentazione sia delle sabbie, che transitano lungo il canale, sia di un fango idrato e poco compatto.

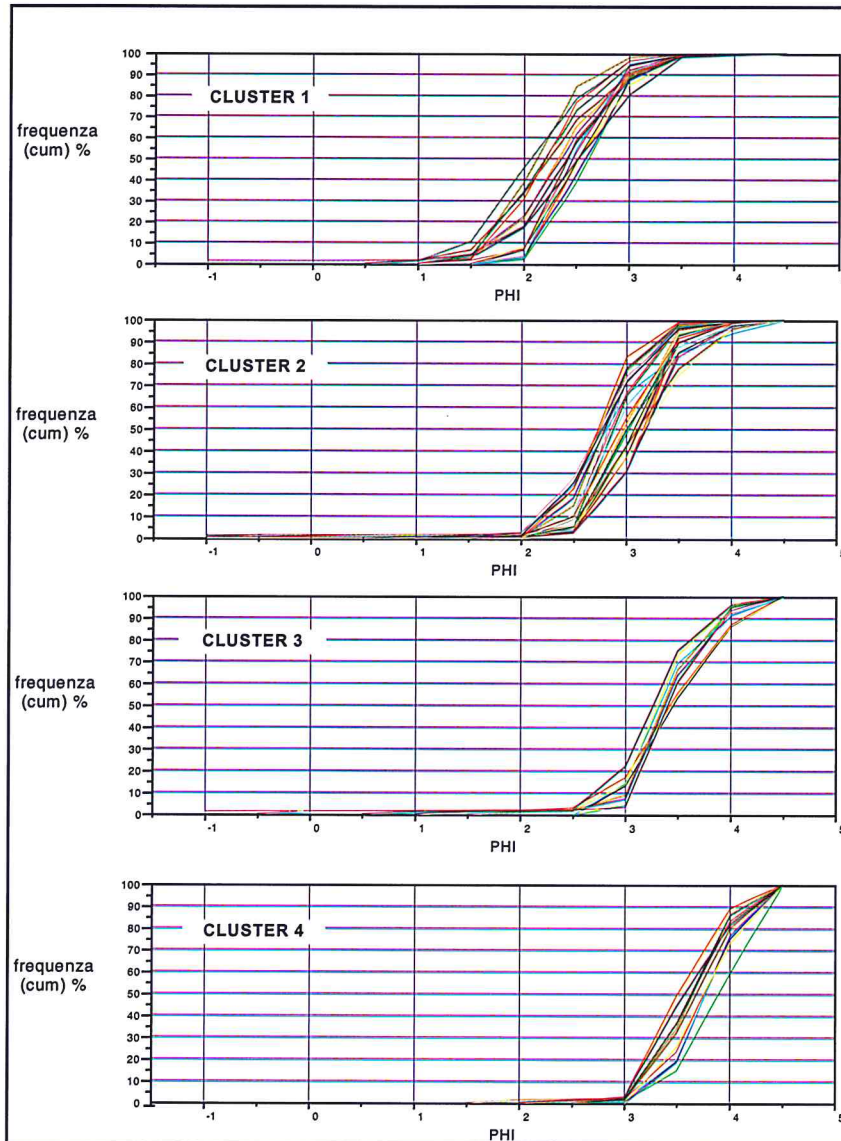


Figura 13 - Fusi dimensionali dei quattro raggruppamenti del cluster.

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 ϕ , mantenendo però un centroide di 2.5 ϕ .

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 ϕ , con variazioni laterali da 2.5 a 3.5 ϕ .

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 ϕ .

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 ϕ , con centroide pari a 4.0 ϕ ; in questo caso prevale un'asimmetria negativa.

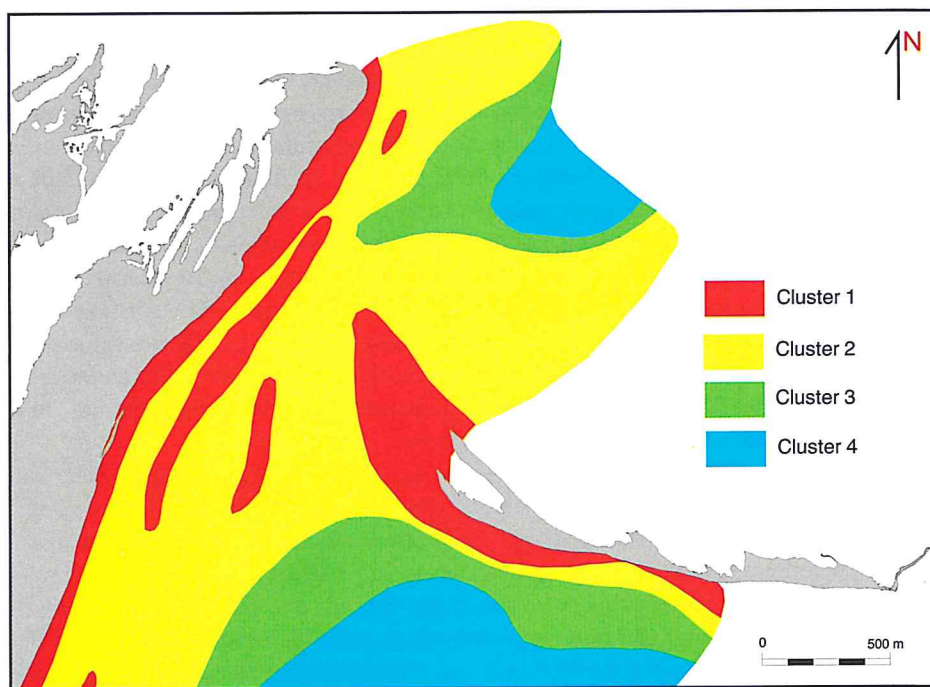


Figura 14 - Distribuzione areale dei cluster nella bocca principale (occidentale) della Sacca di Goro.

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 *spit*, 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.

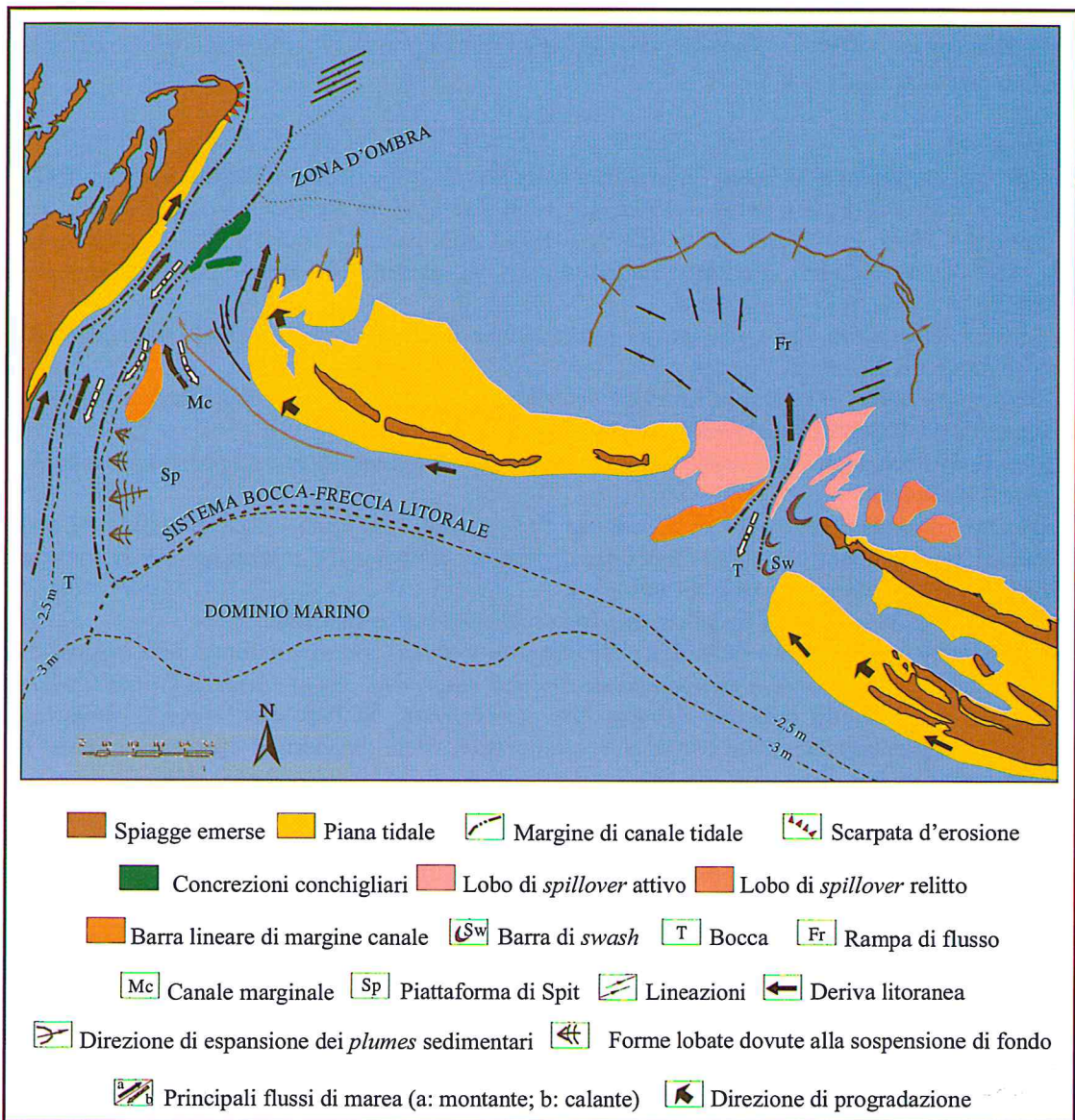


Figura 15 - Schema morfodinamico delle bocche lagunari della Sacca di Goro.

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 4ϕ .

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 redistribuzione 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. 7th 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. 14th 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. 13th 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.