

Stratigrafia dei depositi recenti della Sacca di Goro

Giorgio Fontolan¹, Stefano Covelli¹, Annelore Bezzi¹,
Virginie Tesolin¹ e Umberto Simeoni²

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

²Dipartimento 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'oggetto 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.

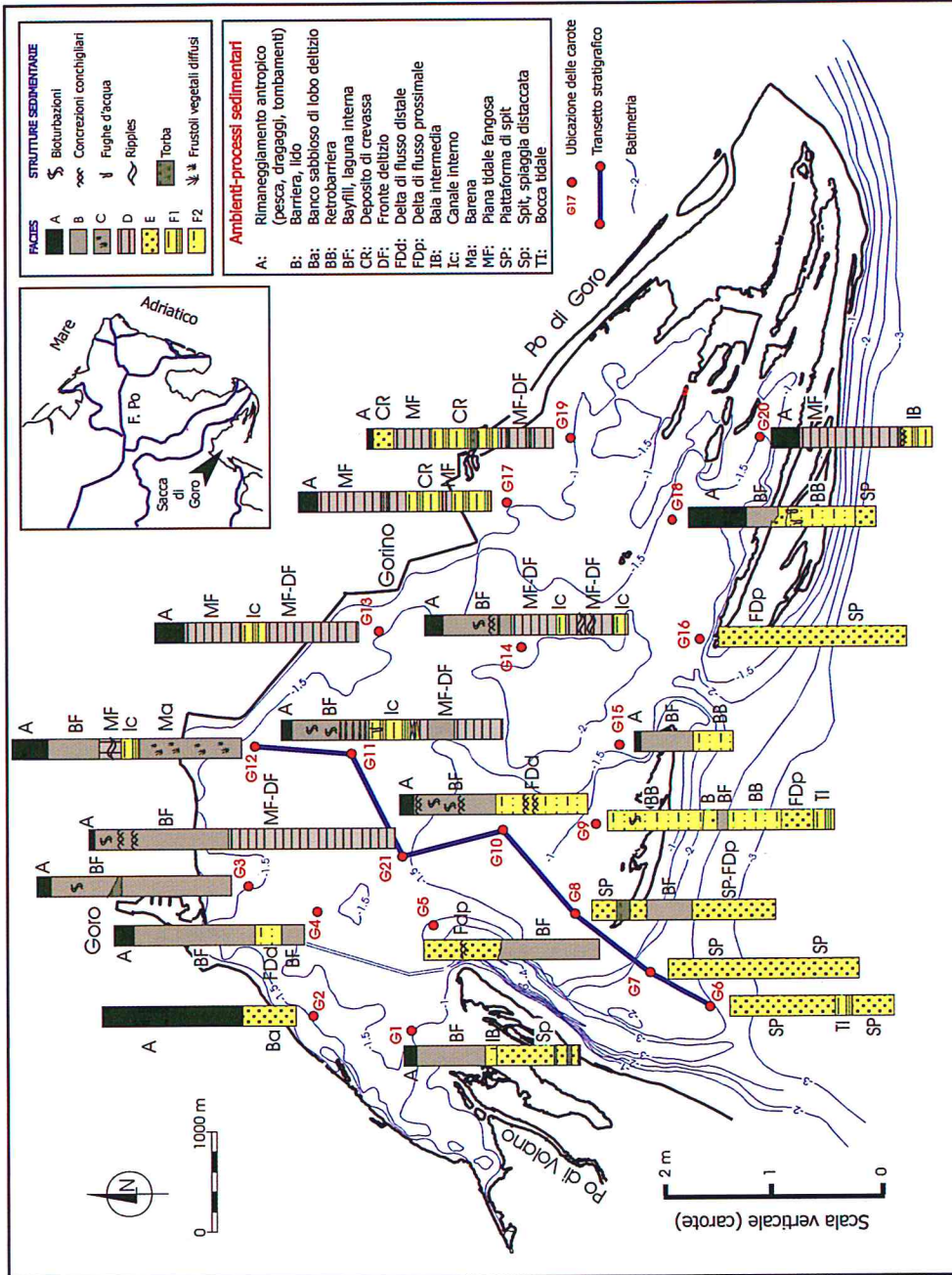


Fig. 1 - L'area di studio, nella quale è riportata la distribuzione areale delle facies e subfacies fondamentali (per la descrizione dettagliata si rimanda al testo). Accanto a ciascuna carota sono indicate le sigle degli ambienti e i processi sedimentari desunti dall'analisi di facies.

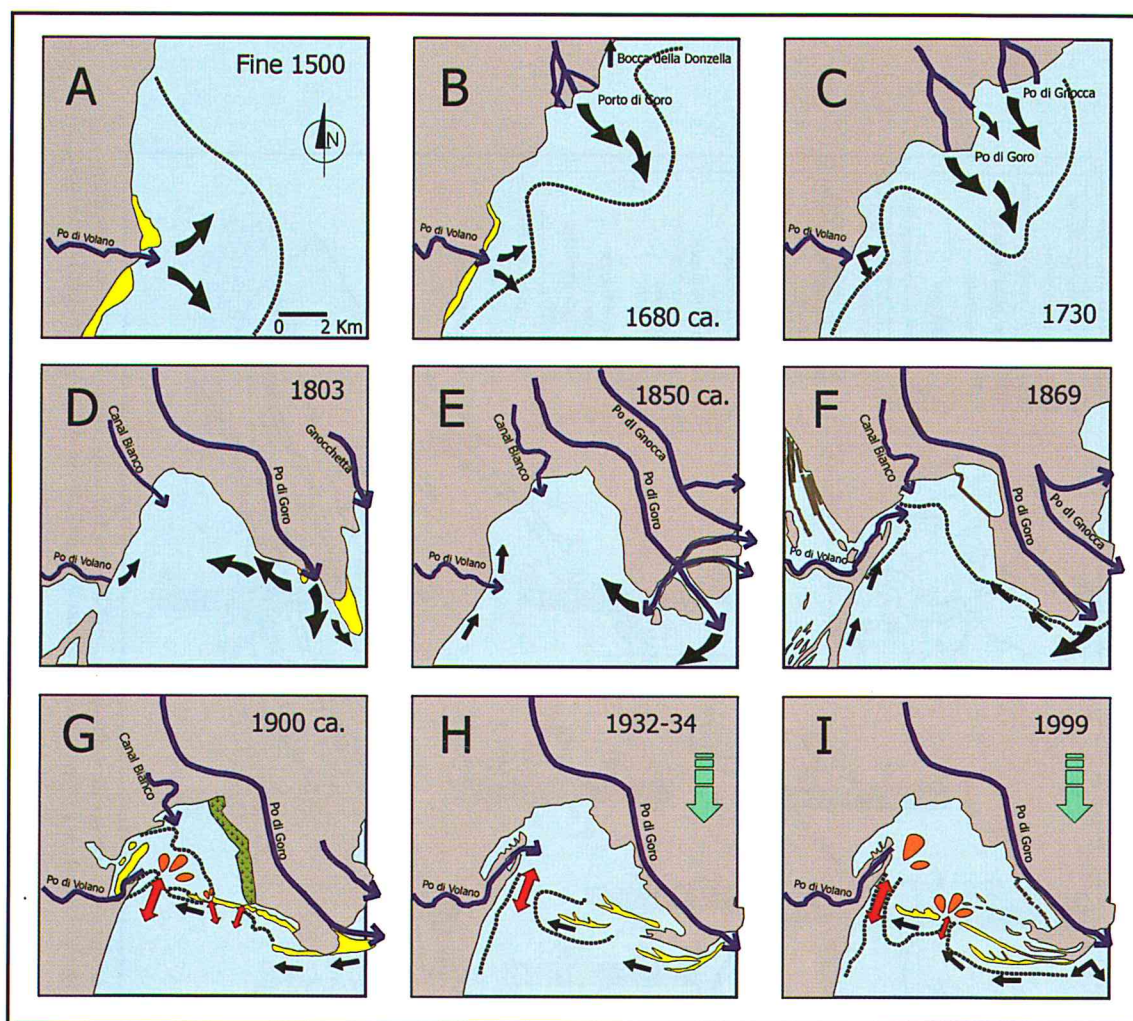


Figura 2 - Schema evolutivo dell'area del Po di Goro dalla fine del XVI secolo ad oggi. I riquadri delle figure sono riferiti sempre alla stessa area; a titolo indicativo sono riportate, in tratteggio, le configurazioni batimetriche delle basse profondità, intorno al metro. Le varie fasi sono desunte 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 km² 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 complessivi¹ 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'ingresso marina durante le mareggiate. I) 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.

¹ 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.

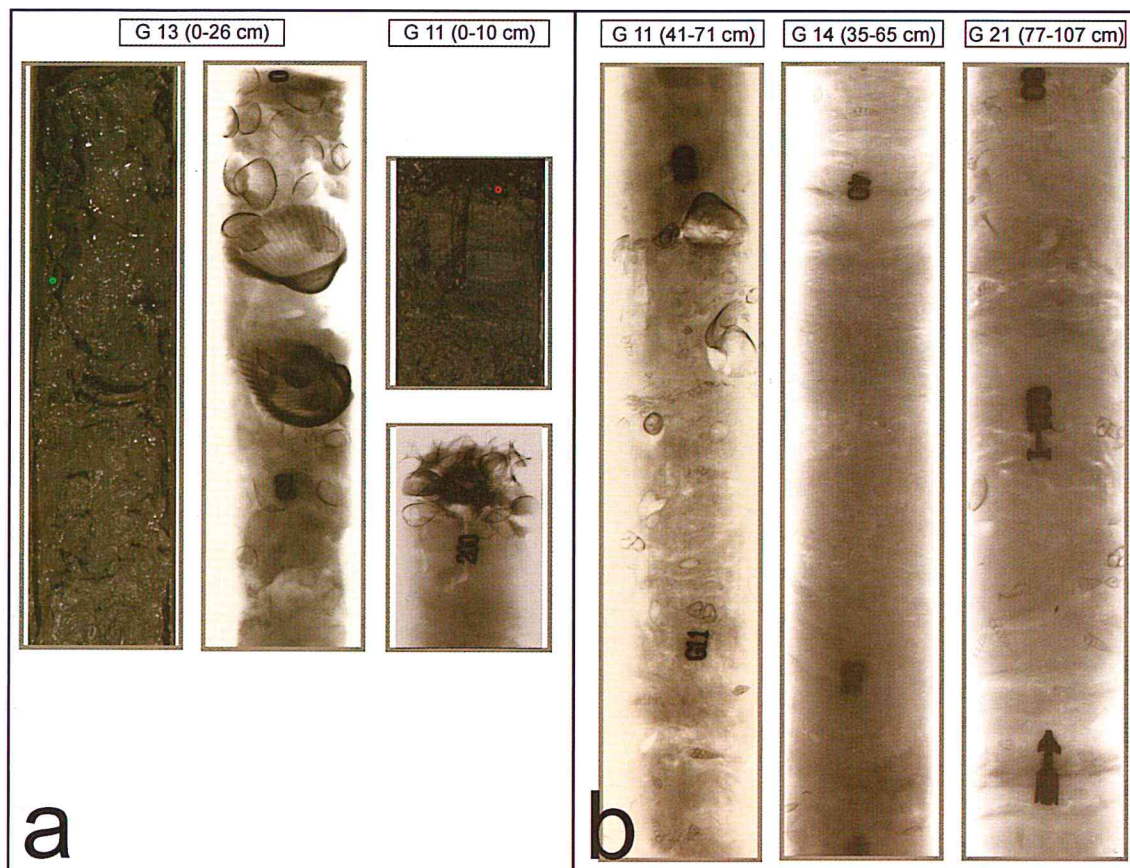


Figura 3 - a) Confronto tra fotografia e radiografia a raggi X (positivo) della parte sommitale delle carote G13 e G11, in cui è ben rappresentata la facies A. Già in fotografia la carota G13 mostra un elevato grado di idratazione ed un aspetto caotico del fango; le radiografie evidenziano l'assenza 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).

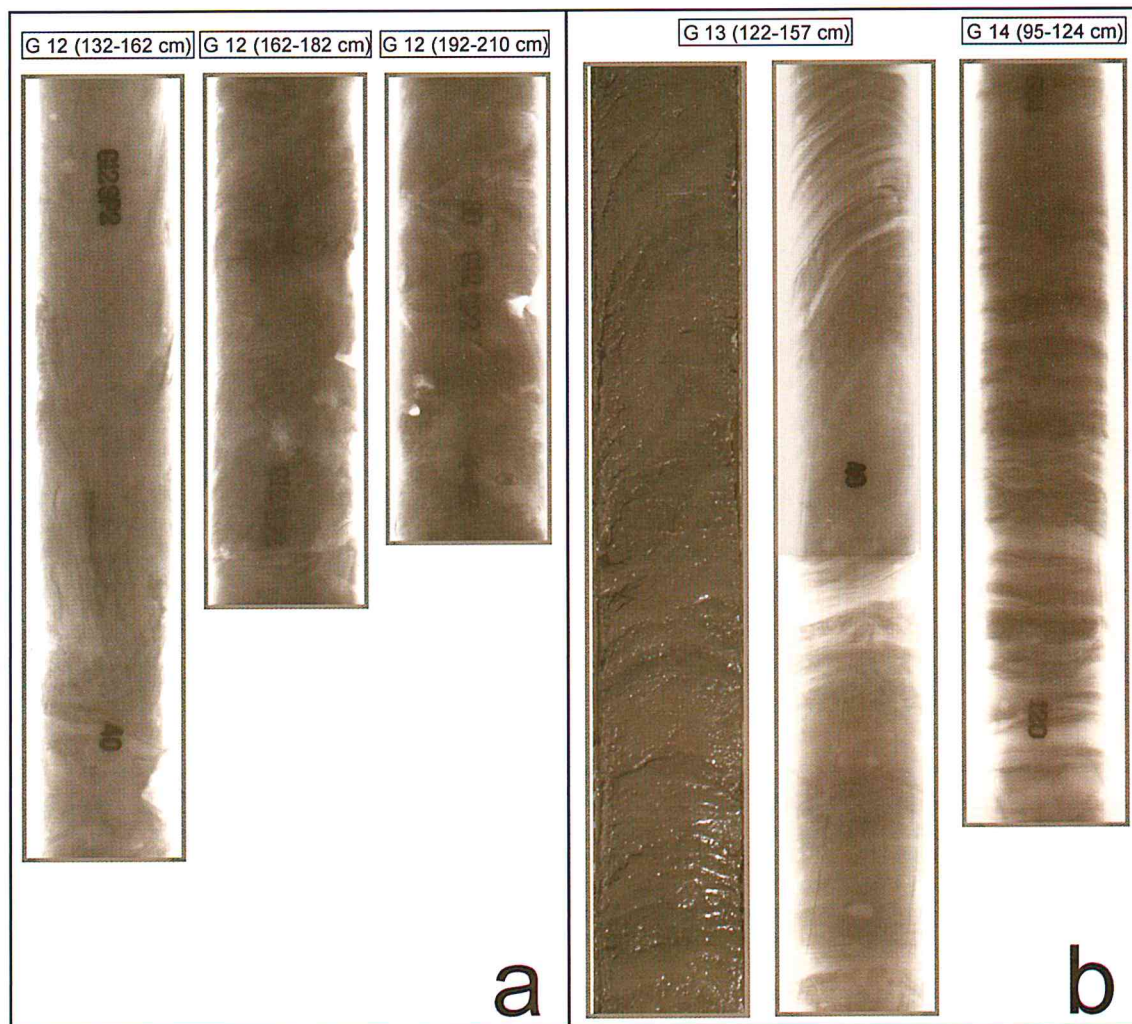


Figura 4 - a) Radiografie a raggi X (positivo) del secondo spezzone della carota G12, unico esempio della facies C. Il fango è compatto ma dall'aspetto maculato, con prevalente struttura fluidificata longitudinale. Le intercalazioni argillose irregolari sono di colore leggermente più chiaro. Non si notano 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.

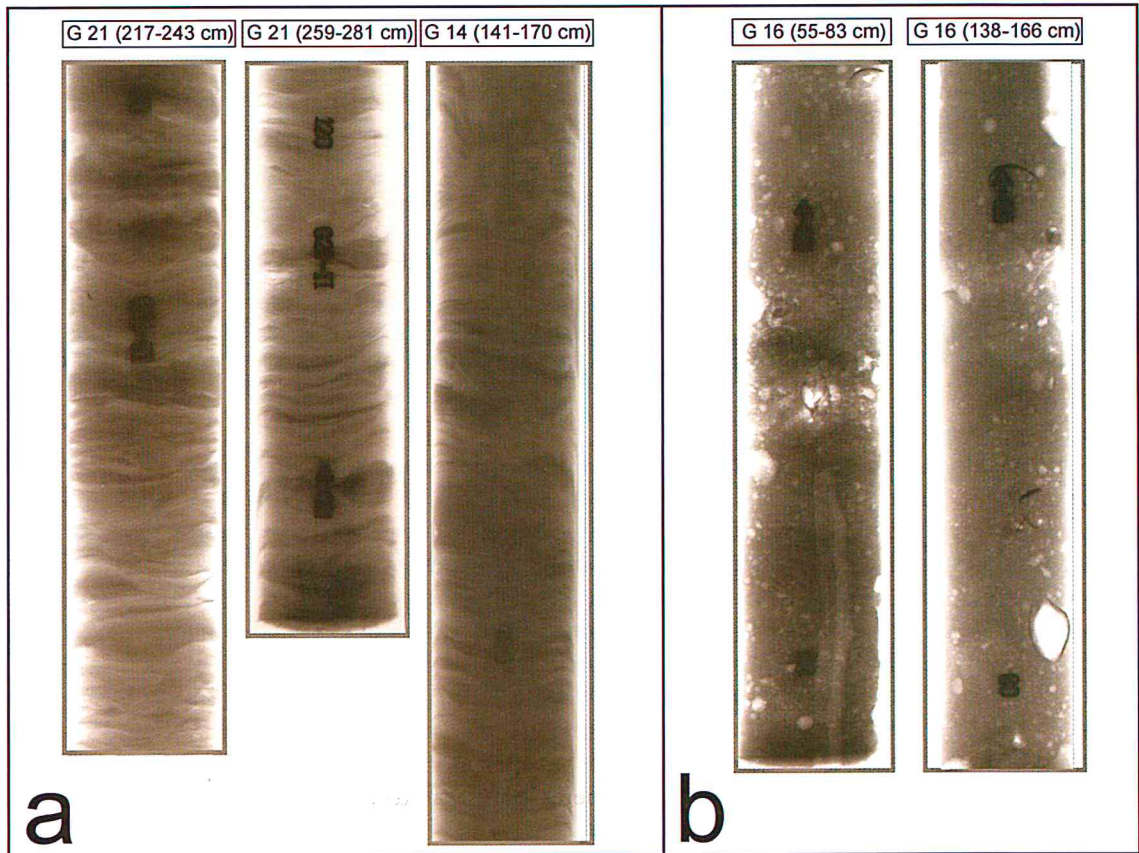


Figura 5 - a) Radiografie a raggi X (positivo) di due parti della carota G21 e di una parte della carota G14 in cui sono ben rappresentate le sequenze siltoso-argillose laminato della facies D. La laminazione prevalente è di tipo ondulato non parallelo. Al top della radiografia della carota G14 si può 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 paralogunari 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 F₁ (per es. in G11, G12, G13 e G20) (Fig. 6a);
- 2) subfacies F₂ (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.

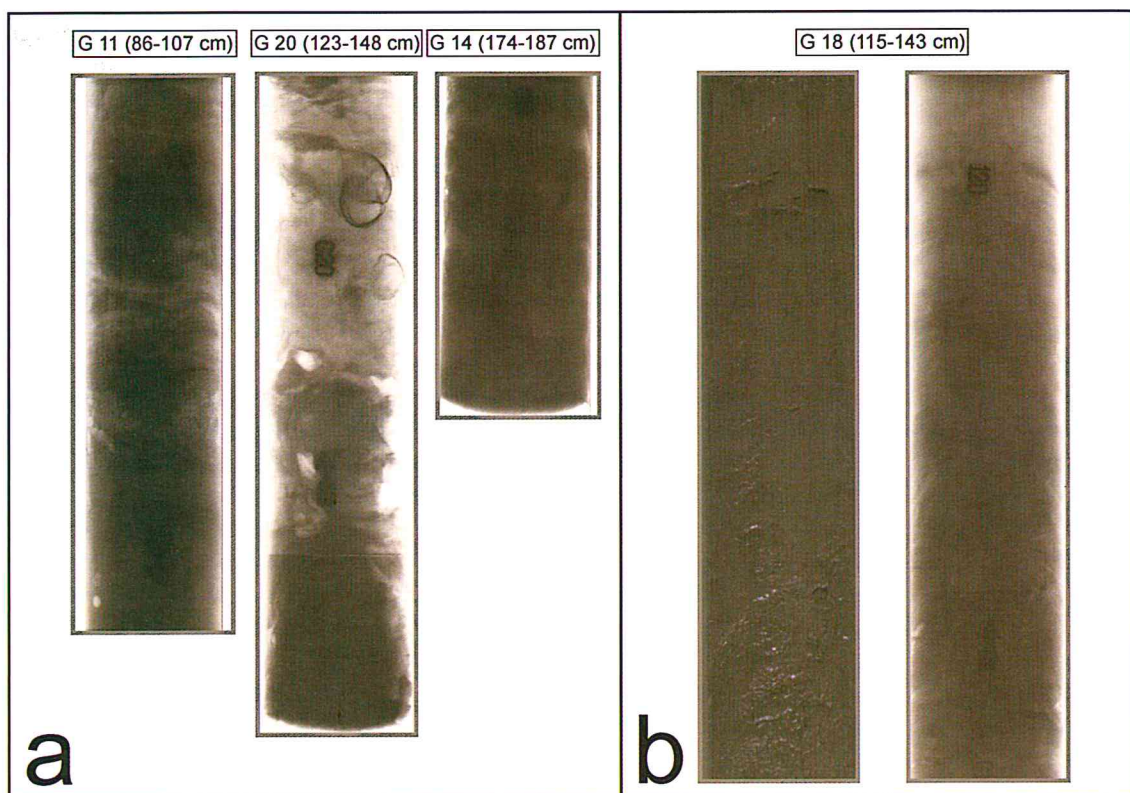


Figura 6 - a) Radiografie a raggi X (positivo) di una parte della carota G11, una della carota G20 ed una della carota G14, rappresentative della facies F₁. Quest'ultima è costituita da sabbie fini talora siltose, con intercalazioni fangose di colorazione più chiara e rari resti conchigliari. b) Confronto tra la radiografia a raggi X (positivi) e la fotografia di una parte della carota G18 in cui è rappresentata la facies F₂. Il sedimento è una sabbia siltosa pressoché massiva e, nel caso in esame, apparentemente sterile.

Ambiente e processi deposizionali:

La facies F₁ 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 F₂ 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 F₂ 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 F₁ 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 F₂, 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 deltidio, precedenti all'annegamento e al riempimento con fanghi di bayfill - laguna.

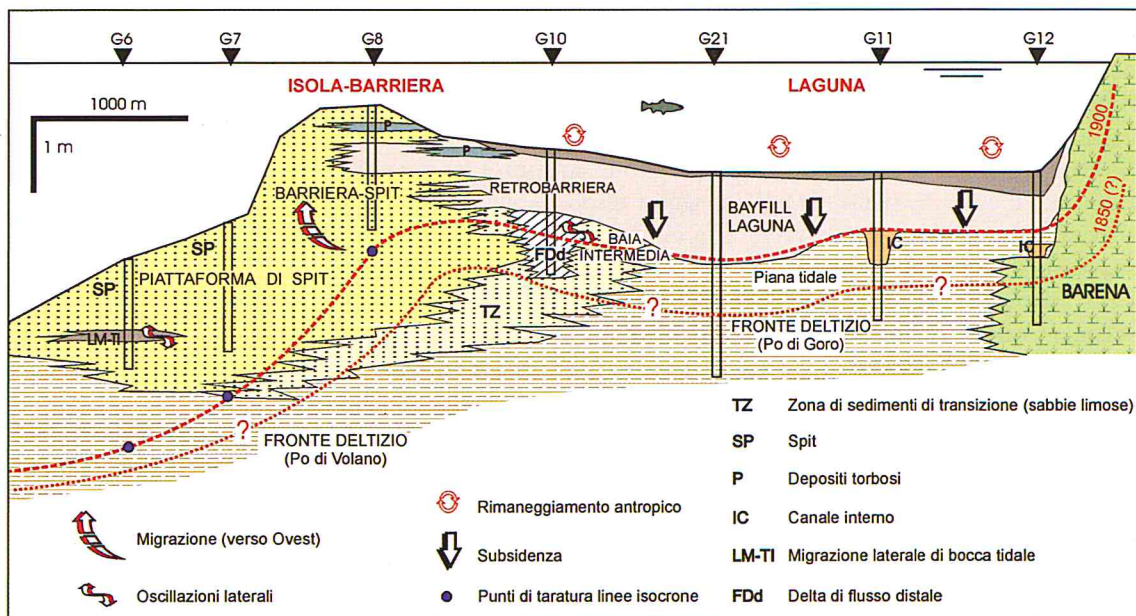


Figura 7 - Schema stratigrafico-evolutivo della Sacca di Goro (cfr. Fig. 1 per l'ubicazione del transetto e per la legenda relativa alle carote). La configurazione è quella tipica dei sistemi barriera-laguna, che nel caso in esame è controllato dal bilancio tra carico terrigeno e subsidenza. All'interno 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 deltidio 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)*. 35th 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 inshore 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.