

Il modello morfo-sedimentario dei maggiori delta tirrenici italiani

PIERO BELLOTTI (*)

RIASSUNTO

I caratteri morfologici, sedimentologici e stratigrafici dei quattro maggiori delta della costa tirrenica consentono di delineare un particolare modello deltizio inquadrabile nei delta a dominio ondoso. Esso si sviluppa dalla stabilizzazione del livello marino (ultimi 6000 anni), su un margine passivo con piattaforma a debole acclività e mostra una geometria composita con una parte interna tabulare, spesso pochi metri, ed una esterna lentiforme con spessori massimi prossimi a 70 m. Il corpo deltizio giace sulla superficie di *maximum flooding* della sequenza deposizionale generata dall'ultima oscillazione glacioeustatica del livello marino; il suo substrato è costituito per lo più dal sistema trasgressivo della sequenza stessa.

Caratteri morfologici. La piana deltizia interna si presenta piatta, con quote prossime al livello del mare, ed è stata a lungo sede di stagni e paludi oggi bonificati. La piana deltizia esterna è caratterizzata da cordoni costieri e dune che ne scandiscono i ritmi della progradazione e che, localmente, possono isolare piccoli ed effimeri bacini salmastri. Il canale fluviale, sempre singolo, è sinuoso nella piana deltizia interna e più rettilineo in quell'esterna e risulta piuttosto stabile. Il fronte deltizio si estende fino a -20, -25 m con deboli acclività, fondali piatti e barre litorali in prossimità della riva. Il prodelta ha fondali più acclivi con profilo convesso nella parte proximale e concavo nel raccordo con la piattaforma; può presentare talvolta fenomeni d'instabilità gravitativa.

Distribuzione dei sedimenti. Nella piana deltizia interna sono diffusi i fanghi limoso-argillosi talvolta con torba mentre le sabbie, spesso fangose, sono limitate in prossimità del canale fluviale. Nella piana deltizia esterna cordoni litorali e dune sono costituiti da sabbie da medio a fini; i fanghi con sostanza organica sono presenti solo negli effimeri bacini tra i cordoni.

Evoluzione. Alla stabilizzazione del livello marino il contesto paleogeografico era caratterizzato da un fiume che sfociava in una laguna. Questa era limitata verso mare da una barriera che costituiva l'ultima spiaggia del sistema trasgressivo. In una prima fase (6000-3000 anni B.P.) la laguna rappresentava il depocentro del sistema, il suo colmamento ha originato il corpo tabulare corrispondente in gran parte all'attuale piana deltizia interna. Nella seconda fase il depocentro si sposta in mare e si origina un delta a dominio ondoso. Questo progradava con meccanismi differenti in funzione del rapporto tra carico fluviale ed energia del moto ondoso. In un primo momento la progradazione procede per giustapposizione di cordoni paralleli tra loro; in seguito, all'aumentare del rapporto tra carico fluviale ed energia del moto ondoso, la progradazione si sviluppa particolarmente nell'area di foce, con generazione di un delta cuspidato mentre, al diminuire del rapporto, la parte apicale si erode e la progradazione procede lungo le ali. I due ultimi meccanismi si sono alternati negli ultimi duemila anni e le cause vanno ricercate nelle variazioni climatiche secolari e nell'interferenza dell'attività antropica con l'ambiente naturale.

TERMINI CHIAVE: *Delta, Progradazione, Olocene.*

ABSTRACT

MORPHO-SEDIMENTARY MODEL OF THE MOST IMPORTANT ITALIAN TYRRHENIAN DELTAS - It is possible to define a particular wave

(*) Dip. Scienze della Terra, Università di Roma «La Sapienza» P.le Aldo Moro, 5 - 00185 Roma.

Lavoro redatto con finanziamenti Ateneo, responsabile Piero Bellotti, nell'ambito del Cofinanziamento MURST 1998 - Bilancio sedimentario dei sistemi costieri italiani, processi naturali e influenze antropiche.

dominated delta pattern in consideration of morphologic, sedimentologic and stratigraphic features of the four greatest tyrrhenian deltas. This pattern developed, after the sea level still stand (last 6 kyr), on gently sloping shelf of a passive continental margin. The delta body shows a composit geometry with a tabular inner part, few meters thick, and a lenticular outer part about 70 m thick. The delta body lies on a maximum flooding surface of the last glacial depositional sequence (BELLOTTI *et alii*, 1994)

Morphologic features. The inner delta plain is very flat and there were, as far as 150 years B.P., ponds and marshes today reclaimed. The outer delta plain shows beach ridges and coastal dunes which locally include small and ephymeral brackish basins. The river present a single channel without levees which is somewhat steady, it is winding in the inner delta plain and more rectilinear in outer delta plain. The delta front shows a gently sloping flat bottom between 0 and -20 m; littoral bars are present only close to the beach. The prodelta shows steep bottom (as far as 1°3) with convex profile and sometimes synsedimentary creep (BELLOTTI *et alii*, 1989).

Sediments distribution. Mud, muddy clay and organic clay are widely present in inner delta plain. Sand and muddy sand are present close to the river channel. In the outer delta plain, medium to fine sands constitute beach ridges and coastal dunes, mud and organic mud are present only into brackish ephymeral basins.

Evolution. At high sea level still-stand, the river flowed directly into a coastal lagoon closed seaward by a barrier beach which represents the last beach of the transgressive system tract. In the first time (6-3 kyr B.P.), the lagoon was the depocenter of the system and lagoon infilling constituted a tabular body correspondent to actual inner delta plain. In the last 3 kyr the depocenter moved into the sea and a wave dominated delta developed. The fluvial load/wave power ratio, drives the delta progradation. In the first time the progradation occurs with development of parallel beach ridges. Successively due to an increased of the fluvial load/wave power ratio, delta progradation developed particularly in river mouth area and cusped delta was generated. Due to a reduction of the fluvial load/wave power ratio, the apical part was eroded and progradation took place along the delta wings.

Variations in the fluvial load/wave power ratio depends by secular climatic modifications and anthropic activity (BARTOLINI, 1983).

KEY WORDS: *Delta, Progradation, Holocene.*

INTRODUZIONE

Ad una prima osservazione degli apparati deltizi delle coste italiane (fig. 1), si evidenziano quattro principali tipologie alle quali appartengono:

a) delta di ampiezza limitata a sedimentazione medio-grossolana, sviluppati su piattaforma acclive o di limitata ampiezza e legati a un bacino idrografico che si apre in catene costiere. Esempi di questa tipologia sono i delta del Fiume Centa (Mar Ligure) e del Fiume Crati (Mar Ionio);

b) delta di ampiezza limitata a sedimentazione per lo più fine, evolventi in area protetta e piattaforma a limitata acclività nonché generalmente legati a corsi d'acqua di non grande rilievo come ad esempio il Fiume Isonzo (Mar Adriatico);

c) delta di medie dimensioni con sedimenti medio-fini, che sviluppano estese piane deltizie a cordoni



Fig. 1 - Ubicazione dei sistemi fluvio-deltizi citati nel testo.
- Location of the fluvio-deltaic systems described in the text.

costieri e si evolvono su piattaforma ampia e poco acclive. Questi sono legati a fiumi di una certa importanza del versante tirrenico e adriatico come il Tevere, l'Arno e il Tagliamento;

d) delta di grandi dimensioni con sedimenti medio-fini, che si evolvono su piattaforma ampia a bassissima acclività legati a corsi d'acqua di relativa grande portata

che generano canali distributori multipli. Si può ascrivere a questa tipologia il solo delta del Fiume Po (Mar Adriatico).

Essendo i mari italiani caratterizzati da un regime microtidale, tutti gli apparati deltizi si sviluppano essenzialmente in funzione del rapporto tra carico fluviale ed energia del moto ondoso; essi si allineano, pertanto, nella classificazione ternaria (GALLOWAY, 1975), lungo la congiungente i modelli a dominante ondosa e fluviale. In tale classificazione, tuttavia, vengono talvolta considerati di uno stesso gruppo, delta diversi per morfologia e dinamica sedimentaria come i delta a dominio ondoso dei fiumi Centa (FIRPO *et alii*, 1992), Tevere (BELLOTTI *et alii*, 1989) e Crati (COLELLA, 1988).

In questa nota vengono presi in considerazione i delta dei quattro maggiori fiumi tirrenici (inquadabili nella tipologia c): Arno, Ombrone, Tevere e Volturno, nel tentativo di delineare un modello deltizio presente sulle coste italiane. I dati fin qui analizzati non consentono un'uguale conoscenza dei quattro delta, i cui principali parametri quantitativi sono riportati in tab. 1, ma rendono tuttavia possibile tracciarne i lineamenti morfologici e dinamici salienti, cogliendone elementi comuni e specifiche diversità.

Il lavoro è stato condotto rivisitando i dati della letteratura specifica, acquisendo nuovi dati di terreno e di sottosuolo e analizzando cartografie storiche e dati batimetrici nonché immagini aeree. In particolare da queste ultime sono stati calcolati gli angoli di intersezione tra l'asse dei cordoni costieri, la cui datazione è già in buona parte riportata in letteratura, e l'asse del canale distributore definendo tre classi (fig. 2) i cui limiti sono stati scelti empiricamente. «Classe A», con somma degli angoli verso monte (\hat{S}) uguale o maggiore di 180° , «classe B» con \hat{S} compreso tra 180° e 140° e «classe C» con \hat{S} inferiore a 140° . Dalla posizione dei cordoni costieri, visibili in foto aerea o rintracciabili in perforazione sotto le alluvioni recenti, è stato calcolato l'incremento superficiale della parte emersa dei delta nei diversi momenti storici.

TABELLA 1

Dati generali caratteristici degli apparati deltizi considerati I valori dei venti relativi al Volturno sono sovrastimati per la particolare posizione della stazione anemometrica d. Ponza. I dati sono tratti da Autori diversi e i valori medi riguardano i più lunghi periodi di registrazione.

- General characteristic data of the described delta systems. The exposure to the wind of Ponza anemometric station (Volturno data) is greatest respect to the river mouth. Data come by different Authors.

SISTEMA DELTIZIO		ARNO	OMBRONE	TEVERE	VOLTURNO
Lunghezza del fiume	Km	241	161	405	175
Ampiezza bacino	Kmq	8221	3496	17156	5558
Portata media mensile min/max	mc/s	8/192	4/50	128/350	18/90
trasporto torbido medio annuo milioni di tonnellate/anno verso corrente costiera		2 N	1.8 NW	5 NW	1.4 variabile stagionale
venti dominanti °Beaufort / direzione		3/varie	4/S	6/varie	12/varie
venti regnanti °Beaufort / direzione		3/E	3/N-NE	6/W	10/W
distanza tra riva e -20m	km	7	2.5	4	4
distanza dello <i>shlf break</i>	km	28	23	15	16

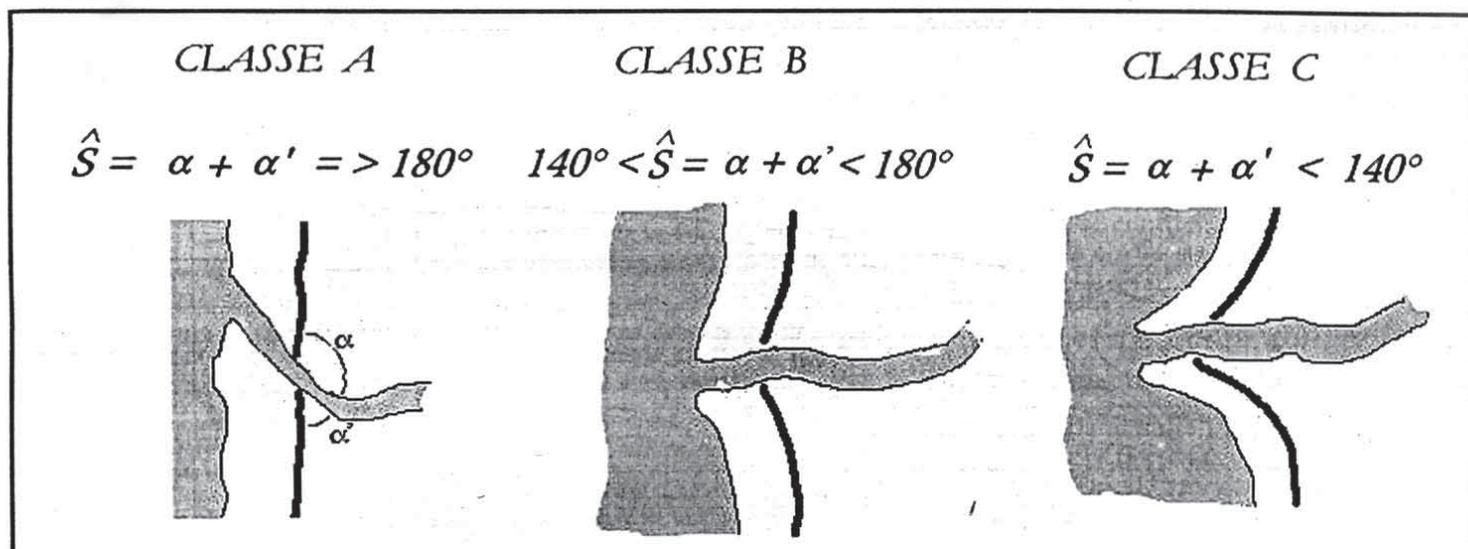


Fig. 2 - Suddivisione empiricamente tripartita del valore angolare dell'intersezione tra asse dei cordoni costieri e asse del canale distributore. - *Threefold division of intersection angular value among beach ridges axis and distributary channel.*

LINEAMENTI PRINCIPALI DEI QUATTRO DELTA MEDIOTIRRENICI

DELTA DEL FIUME ARNO (fig. 3)

La porzione emersa del delta, attraversata in parte anche dal Fiume Serchio probabilmente un tempo affluente dell'Arno nell'area pisana, costituisce parte della piana costiera pisano-versiliese mentre la parte sommersa si sviluppa sulla piattaforma continentale della Toscana centro-settentrionale.

Superficie emersa

La parte più interna (piana deltizia interna) si presenta generalmente pianeggiante, con tracce di alvei fluviali abbandonati a dimostrazione della notevole instabilità naturale dei canali fluviali dell'Arno e del Serchio (DELLA ROCCA *et alii*, 1987). Tale aspetto deriva, in parte, anche dall'attività dell'uomo che negli ultimi duemila anni ha parzialmente modificato i corsi fluviali e bonificato le aree paludose che sorgevano alle spalle dei cordoni della fascia costiera (MAZZANTI, 1983; PASQUINUCCI & MAZZANTI, 1985). Questa complessità si riflette anche nella distribuzione dei sedimenti superficiali. Essi sono prevalentemente limoso-argillosi con abbondante sostanza organica nelle aree un tempo paludose; le sabbie limose e i limi più o meno argillosi caratterizzano, invece, le aree soggette alle tracimazioni dai canali fluviali attivi nei diversi periodi storici. Sabbie fini, attribuite ad un eolico preversiliano (DELLA ROCCA *et alii*, 1987), sono presenti a sud dell'Arno (area di Coltano).

Una serie di cordoni litoranei caratterizza la fascia costiera (piana deltizia esterna). Questi definiscono le antiche linee di riva e sono in più punti rielaborati dal vento a formare delle dune, e intercalati da zone depresse che costituiscono talvolta effimere aree paludose. I cordoni più interni, ritenuti precedenti al IV secolo d.C., sono quasi paralleli tra loro hanno un'intersezione di classe A con il vecchio corso dell'Arno. I cordoni post romani perdono il parallelismo in prossimità del corso fluviale e si ha l'alternarsi di intersezioni di classe B e C. In particolare per i cordoni datati tra XII e XV secolo, il

valore di \hat{S} è di 160-140°, successivamente, tra i secoli XVI e XVII, i valori angolari si riducono fino a 75° per crescere nella seconda metà del XIX secolo raggiungendo 170° circa nel XX. La piana deltizia esterna, che ha raggiunto la sua massima estensione areale nel XIX secolo (fig. 4), era già sviluppata per circa il 10% nel periodo imperiale romano e per circa il 50% nel XV secolo. Nell'ultimo secolo si è avuta una perdita nella zona apicale, non compensata da un incremento lungo le ali. I sedimenti superficiali sono caratterizzati da sabbia medio-fine; nelle aree più depresse o prossime ai corsi fluviali compaiono anche limi sabbiosi, limi e argille limose localmente ricchi di sostanza organica.

Fondali

Presentano un'acclività media intorno a 0°.48 fino a -10 m e 0°.10 tra -10 e -20 m; più al largo essa varia tra 0°.21 (-20/-50 m) e 0°.32 (-50/-100 m). Le isobate non si protendono in mare (AIELLO *et alii*, 1976; DE SIMONE *et alii*, 1993) come è tipico per i corpi deltizi ben sviluppati ma il loro andamento ha consentito di tracciare un possibile alveo dell'Arno durante l'ultimo stazionamento basso del livello marino (SEGRE, 1955). La distribuzione dei sedimenti è caratterizzata dalla presenza di sabbia quasi esclusivamente entro l'isobata di 5 m. Attraverso locali plaghe di sabbie fangose, limitate alla vicinanza delle foci fluviali, si passa già entro l'isobata -10 m a limi, fanghi sabbiosi e fanghi; questi ultimi si estendono fin circa a -100 m dove lasciano il posto ad argille più o meno fangose (ASTRALDI *et alii*, 1993).

Sottosuolo

La scarsità di datazioni su sedimenti del sottosuolo e di prospezioni a mare non consente una completa ricostruzione del corpo deltizio. È possibile tuttavia osservare come il sottosuolo della piana deltizia interna sia costituito da una successione pelitico-sabbiosa attribuibile ad ambienti dulcicolo-salmastri (GALLETTI FANCELLI, 1978). Nella parte più meridionale, tale successione (spessa circa 50 m.) poggia su un livello ghiaioso d'alcuni metri di spessore (GIOLI, 1894) che potrebbe indicare il primo

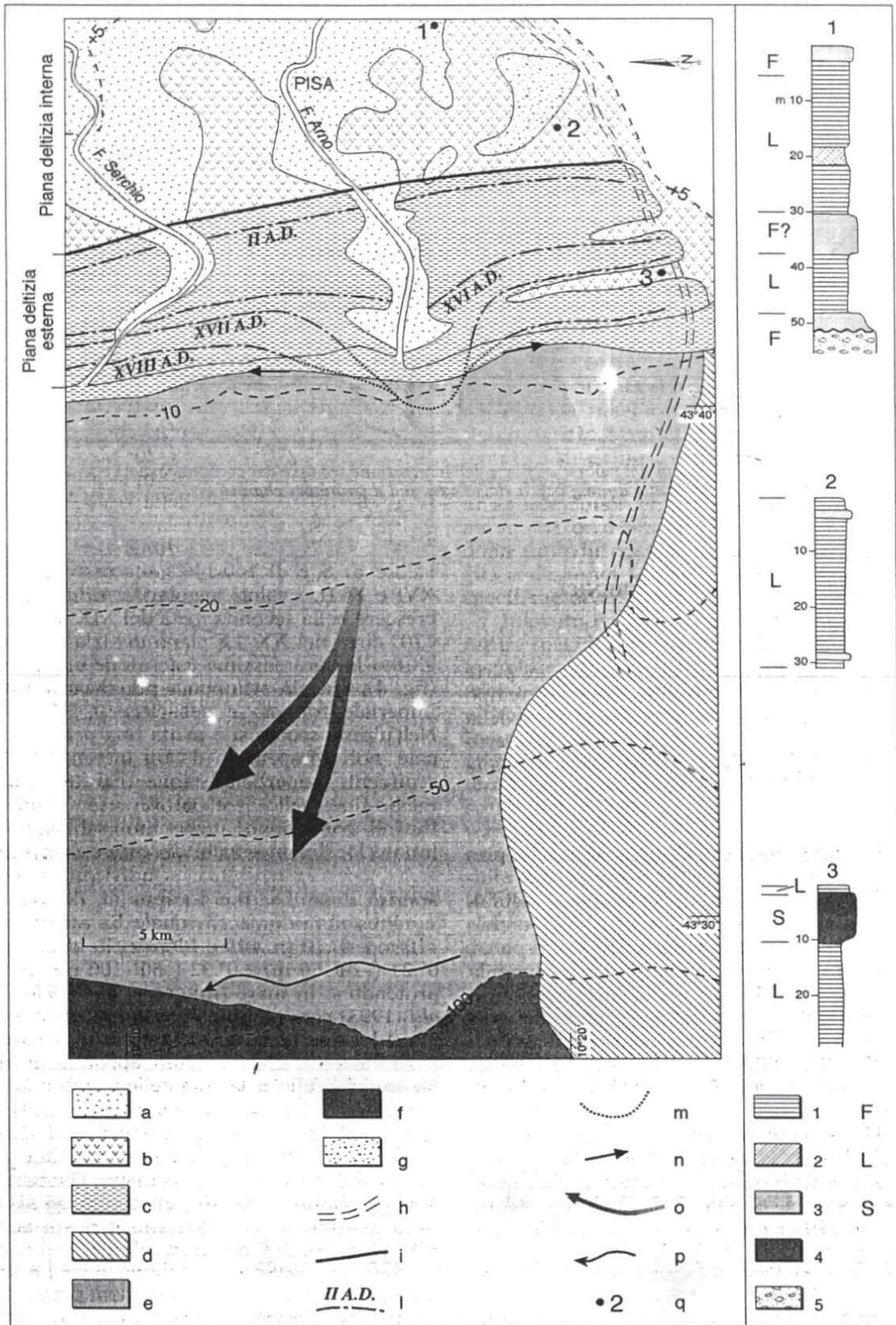


Fig. 3 - Lineamenti morfologici e sedimentologici del delta del Fiume Arno: a) sabbie e peliti alluvionali; b) peliti e peliti torbose lagunari e palustri, colmate di bonifica; c) sabbie di spiaggia e localmente dunari; d) sabbie bioclastiche; e) peliti marine; f) argille di piattaforma; g) depositi pleistocenici; h) probabile andamento del paleoalveo glaciale; i) linea di massima ingressione; l) linee di riva erose; m) linee di riva erose; n) correnti lungo riva; o) andamento del plume; p) corrente costiera; q) ubicazione log stratigrafico; 1) peliti; 2) torbe; 3) sabbie pelitiche; 4) sabbie; 5) ghiaie sabbiose. F) depositi alluvionali; L) depositi lagunari; S) depositi di spiaggia.

- Morphologic and sedimentological features of the Arno River Delta: a) alluvial sand and mud; b) lagoon-marshy organic mud; c) beach or dune sands; d) bioclastic sand; e) marine mud; f) shelf clay; g) pleistocene deposits; h) river channel during the sea level low stand; i) line of the maximum flooding; l) historical shoreline; m) lost shoreline; n) longshore drift; o) common plume trajectory; p) coastal current; q) stratigraphic log location; 1) mud; 2) peat; 3) muddy sand; 4) sand; 5) sandy gravel. F) alluvial deposits; L) lagoon deposits; S) beach deposits.

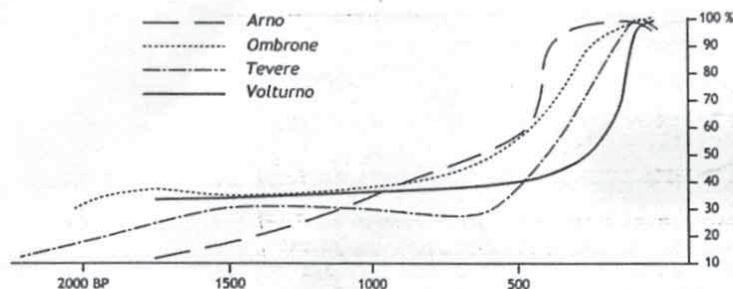


Fig. 4 - Incremento percentuale della superficie della piana deltizia esterna dei maggiori delta tirrenici negli ultimi 2000 anni. I limiti delle aree calcolate sono riportati nel testo e i punti noti sono desunti dai cordoni costieri datati.

- Increase of the outer delta plain surface in the last 2 ky of the described deltas. The boundaries of the areas are indicated in the text, the progradation times are dated by beach ridges.

riempimento della valle incisa dall'Arno durante l'ultimo stazionamento basso del livello marino. I sedimenti costieri, rinvenuti a maggiori profondità, sarebbero dunque appartenenti a cicli precedenti ed in parte coevi con le sabbie che affiorano nell'area di Coltano. Nella piana deltizia esterna, sopra la suddetta successione dulcicolosalmastra, è presente un cuneo sabbioso di spiaggia il cui spessore, di 10-15 m in prossimità dell'attuale riva, si annulla a circa 4 km verso l'interno (GALLETTI FANCELLI, 1978).

DELTA DEL FIUME OMBRONE (fig. 5)

È l'apparato deltizio cui corrisponde il fiume di minor lunghezza e ampiezza di bacino.

Superficie emersa

Il delta del F. Ombrone, ubicato tra l'emissario S. Rocco e i Monti dell'Uccellina, è parte della piana costiera grossetana. Il F. Ombrone è caratterizzato dal canale distributore singolo e privo d'argini naturali. Il suo andamento è meandriforme a monte di Ponte del Diavolo e pressochè rettilineo da qui al mare. In corrispondenza di tale variazione anche la piana presenta diversità morfologiche e sedimentologiche.

La piana deltizia interna, a monte dell'allineamento NNW-SSE passante per il Ponte del Diavolo, è estremamente piatta e interessata da opere di bonifica in parte effettuate per colmata.

La piana deltizia esterna è bialare, cuspidata e asimmetrica (AIELLO *et alii*, 1975); l'ala meridionale è direttamente addossata ai monti dell'Uccellina che fino al Medio Evo costituivano interamente una falesia attiva. Le due ali presentano un ampio sviluppo di cordoni costieri, in buona parte ben conservati; essi superano localmente 5 m di quota e solo sull'ala settentrionale racchiudono alcuni piccoli bacini salmastri formati oltre un secolo fa. I cordoni più interni, ritenuti etruschi e romani (INNOCENTI & PRANZINI, 1993; PRANZINI, 1994), sono paralleli tra loro e leggermente concavi verso mare presentando, dunque, un'intersezione di classe A con il distributore. Dalla fine del periodo romano le intersezioni sono invece di classe B e C. Gli angoli minori sono relativi ad alcuni cordoni del tardo periodo romano e dei periodi compresi tra i secoli XIV-XV (100°) e XVI-XIX (60-80°). Gli angoli maggiori corrispondono all'Alto Medioevo (170°), al XV

secolo e al periodo attuale (150-160°). La piana deltizia esterna ha raggiunto la massima estensione superficiale all'inizio di questo secolo (fig. 4). Essa era già sviluppata per il 30% nel periodo imperiale romano e per oltre il 50% all'inizio del Rinascimento. In quest'ultimo secolo la netta perdita nella zona apicale è stata in parte compensata dall'incremento lungo le ali.

Sabbie e sabbie fangose caratterizzano la piana a cordoni, e fanghi sabbiosi ricchi in sostanza organica i piccoli bacini salmastri. Nella piana interna invece abbondano fanghi sabbiosi, e limi molto sabbiosi in prossimità del canale fluviale (BELLOTTI *et alii*, 1999).

Fondali

Fronte deltizio e prodelta sono ben identificabili dall'andamento del fondale (BARTOLINI, 1983; BARTOLINI & PRANZINI 1985). Il primo si estende fino a -20 m con pendenze medie di 0°38 (0/-10 m) e 0°52 (-10/-20 m), mentre il secondo, con profilo convesso e poi concavo, ha pendenze maggiori di 1° (-20/-50 m) e 0°64 (-50/-100 m). Le isobate dei primi 50 m si protendono verso mare all'apice deltizio e il prodelta risulta ondulato per fenomeni d'instabilità gravitativa.

La distribuzione dei sedimenti è caratterizzata da una fascia di sabbie che si spinge fino -5 m davanti alle ali e -15 in prossimità della foce. Le sabbie di foce passano bruscamente verso il largo a limi sabbiosi, presenti fino a -40 m; oltre tale isobata e fino allo shelf break si estendono i fanghi. Di fronte alle ali il passaggio tra sabbie e limi sabbiosi avviene più gradualmente attraverso fasce più o meno regolari (ALESSIO *et alii*, 1997).

Sottosuolo

I dati stratigrafici, derivanti dalle perforazioni nella piana di Grosseto e dai profili sismici sulla piattaforma meridionale toscana, consentono di individuare parte della sequenza deposizionale tardoquaternaria. Al di sotto dell'attuale piana deltizia s'individua il sistema deposizionale trasgressivo, che colma la paleovalle ubicata tra l'allineamento Grosseto-Canale S. Rocco e i monti dell'Uccellina (BRAVETTI & PRANZINI, 1987). Esso è prevalentemente costituito da peliti salmastre con ripetute variazioni di salinità sia in senso dulcicolo che alino. Tali peliti inglobano, a varie quote, corpi ghiaioso-sabbiosi che tendono alla coalescenza verso terra (BELLOTTI *et alii*, 2000). Questi rappresentano apparati fluvio-deltizi che progradavano nella laguna nelle fasi di quasi stabilità del livello marino, o di maggior apporto fluviale, ed erano sommersi durante le successive fasi d'innalzamento. Spessori e rapporto ghiaia/sabbia sembrano diminuire nei corpi più recenti. Verso mare, sedimenti di barriera litorale costituiscono un cuneo trasgressivo il cui spessore, prossimo a 30 metri nell'area costiera, si annulla nella piana a 5-6 km dall'attuale linea di riva. Al sistema trasgressivo è forse da attribuire il corpo acusticamente trasparente rilevato sulla piattaforma continentale sopra l'inconformità basale (glacial unconformity). La superficie di massima trasgressione (*maximum flooding*) giace pressochè orizzontale 6-8 metri sotto la piana deltizia più interna e s'inclina poi verso mare per raccordarsi con la superficie di inconformità basale presente sulla piattaforma continentale. In questo tratto l'inclinazione della *maximum flooding* dovrebbe essere prossima a 0°30. Al di sopra di questa superficie si è sviluppato il sistema di stazionamento alto che costituisce un corpo a geometria

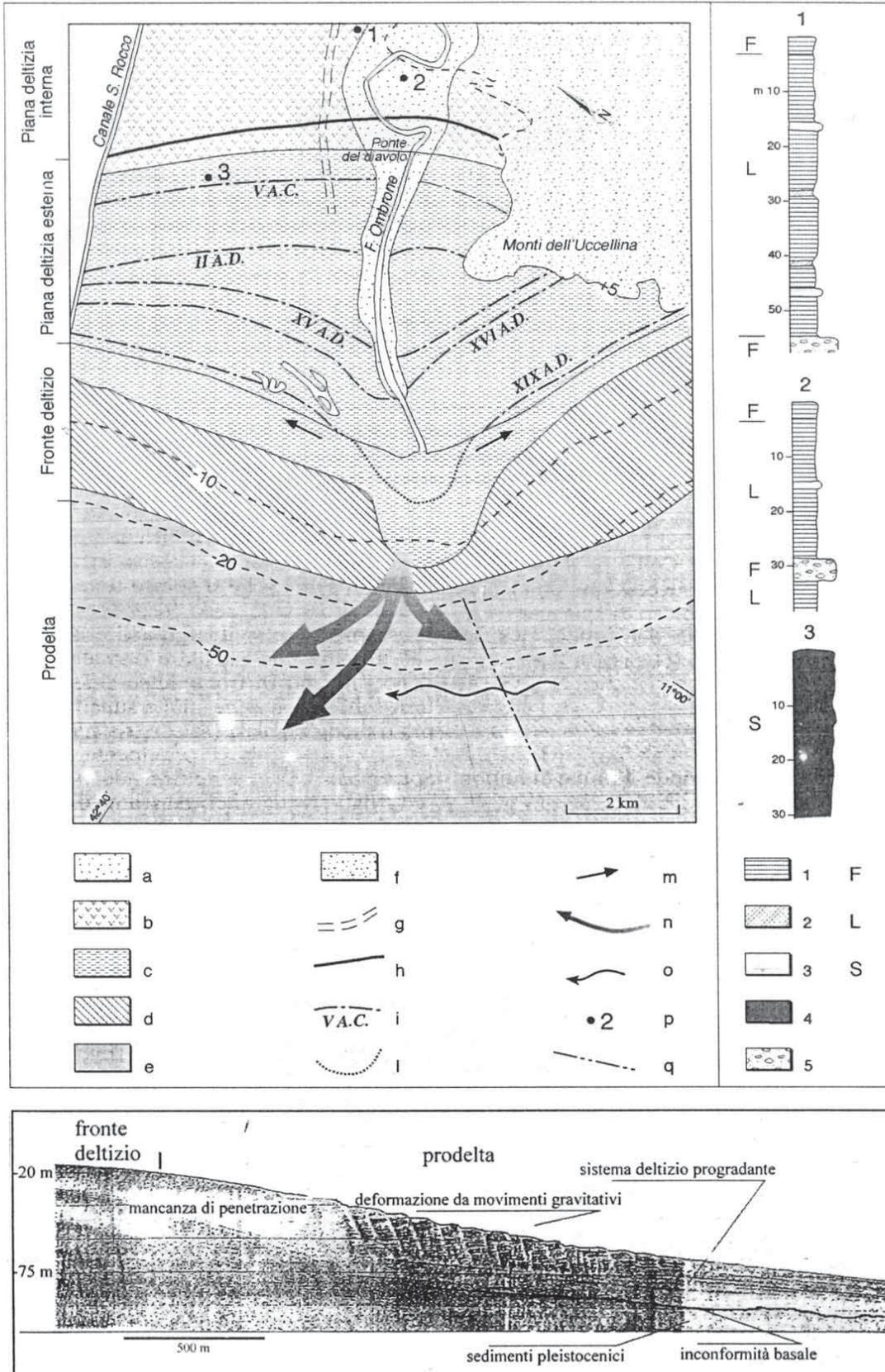


Fig. 5 - Lineamenti morfologici e sedimentologici del delta del Fiume Ombrone: a) sabbie pelitiche alluvionali; b) peliti alluvionali e colmate di bonifica; c) sabbie di spiaggia e localmente dunari; d) sabbie pelitiche di fronte delizio; e) peliti di prodelta; f) depositi preolocenici, g) probabile andamento paleoalveo glaciale; h) linea di massima ingressione marina; i) linee di riva storiche; l) linee di riva erose; m) correnti lungo riva; n) andamento del plume; o) corrente costiera; p) ubicazione log stratigrafico; q) traccia profilo sismico; 1) peliti; 2) torbe; 3) sabbie pelitiche; 4) sabbie; 5) ghiaie sabbiose. F) depositi alluvionali; L) depositi lagunari; S) depositi di spiaggia.

- Morphologic and sedimentological features of the Ombrone River Delta: a) alluvial sand and mud; b) alluvial mud; c) beach or dune sands; d) delta front muddy sand; e) prodelta mud; f) preholocene deposits; g) river channel during the sea level low stand; h) line of the maximum flooding; i) historical shoreline; l) lost shoreline; m) longshore drift; n) common plume trajectory; o) coastal current; p) stratigraphic log location; q) seismic line; 1) mud; 2) peat; 3) muddy sand; 4) sand; 5) sandy gravel. F) alluvial deposits; L) lagoon deposits; S) beach deposits.

complessa. La sua parte più interna è tabulare con facies lagunari, palustri e alluvionali, mentre la restante (spessa fino a 70 m) è lentiforme con facies litorali, di fronte deltizia e di prodelta.

DELTA DEL FIUME TEVERE (fig. 6)

È un apparato deltizio ben conosciuto grazie a numerosi studi specifici sull'intero corpo deltizio.

Superficie emersa

L'area considerata va dal F. Arrone a Tor Paterno (estremo sudorientale) e dalla linea di riva ai primi rilievi. Il canale tiberino si divide in due distributori, quello minore (Canale di Fiumicino) ha tuttavia un'origine artificiale essendo stato scavato in epoca imperiale romana. Il canale fluviale principale scorre fino ad Ostia Antica con andamento sinuoso, e da qui al mare in modo pressochè rettilineo (BELLOTTI *et alii*, 1989). Parallelamente si modifica l'aspetto morfologico e la tessitura dei sedimenti superficiali della piana.

La piana deltizia interna si presenta estremamente piatta con alcune zone depresse circa un metro sotto il livello marino. Il drenaggio di gran parte di quest'area, paludosa fino al XIX secolo, è assicurato da opere di bonifica assistite da impianti idrovori che sollevano le acque facendole defluire in mare attraverso appositi canali. L'innalzamento della falda che si verifica per concomitanti afflussi meteorici e *set up* marini eccezionali, vanifica l'azione delle idrovore con conseguente parziale sommersione delle aree bonificate. I sedimenti sono costituiti da limi, più o meno sabbiosi o argillosi, localmente con abbondante sostanza organica; sabbie limose sono presenti nelle aree prossimali al canale fluviale e in prossimità dei limiti interni della piana.

La piana deltizia esterna appare più o meno ondulata da cordoni litoranei intervallati da bacini salmastri, i maggiori dei quali prosciugati in passato. I cordoni, oggi in parte spianati dalle attività agricole e dall'intensa urbanizzazione, sono spesso rielaborati dal vento a formare dune costiere alte oltre 10 metri nella zona meridionale (BELLOTTI *et alii*, 1989). Tutti i cordoni riconoscibili mostrano intersezioni di classe B e C con l'asse del distributore. Gli angoli (\hat{S}) maggiori sono relativi al primo periodo romano e al XV secolo (140-160°), i valori scendono fino a 70° tra XVI e XIX secolo e sono prossimi a 140° nel XX secolo. Già nel IV secolo a.C. la piana deltizia esterna era sviluppata per oltre il 6% della massima estensione raggiunta nel XIX secolo. Nel periodo imperiale romano era formato il 20% della piana e meno del 30% nel XIV secolo (fig. 4). Lo scarso incremento in quest'ultimo lasso di tempo, peraltro interamente registrato solo sull'ala destra, è tuttavia frutto di una fase d'avanzamento post romana (testimoniata anche da PROCOPIO nel «*de bello gothico*») e della successiva fase erosiva medioevale. Nell'ultimo secolo la forte erosione apicale non è stata completamente compensata dall'incremento delle ali. La piana deltizia esterna è caratterizzata da sabbie medie e fini e localmente da sabbie limose e limi.

Fondali

Anche in quest'apparato, fronte deltizio e prodelta sono ben identificabili. Il primo si estende fino a -25 m con pendenze, misurate sull'asse della foce principale, di

0°.48 (tra 0 e -10 m) e 0°.19 (tra -10 e -20 m). Il prodelta, che si raccorda con la piattaforma attraverso un profilo convesso-concavo, ha pendenze di 1° (-20, -50 m) e di 1°.20 (-50, -100 m). Le isobate presentano un'evidente protrusione e il fondale del prodelta risulta ondulato da fenomeni d'instabilità gravitativa.

La distribuzione del sedimento è gradata orizzontalmente verso il largo. Le sabbie sono per lo più confinate entro l'isobata -5 m, le sabbie limose entro la -10, i limi molto sabbiosi entro la -20, i limi sabbiosi si estendono fino a -75/-80 m, e infine i fanghi raggiungono lo shelf break. La distribuzione del sedimento nei primi 30 m di profondità varia nel tempo in funzione del regime fluviale e del moto ondoso (BELLOTTI & TORTORA, 1997).

Sottosuolo

I dati acquisiti attraverso numerose linee sismiche (a mare), e perforazioni (a terra), consentono di individuare la sequenza deposizionale tarcoquaternaria (BELLUOMINI *et alii*, 1986; BELLOTTI *et alii*, 1994). Questa giace su una superficie d'inconformità rilevata tra 30 e 70 metri di profondità al di sotto della piana e fino a -120 m sulla piattaforma continentale. Nella sequenza sono ben individuabili il sistema trasgressivo e quello di stazionamento alto. Il primo è caratterizzato nella piattaforma media da ridotti spessori pelitici (sezione condensata) e sotto la piana da un complesso «barriera-laguna-delta lagunari» in retrogradazione durante la risalita del mare (BELLOTTI *et alii*, 1995). Tale complesso colma la paleovalle incisa durante l'ultimo glaciale. La superficie di *maximum flooding*, che chiude al tetto il sistema trasgressivo, si sviluppa pressochè orizzontalmente 5-6 metri al di sotto della piana interna, assumendo poi una maggiore pendenza (0°.28) sotto la piana a cordoni. Su tale superficie ha progradato il corpo regressivo di stazionamento alto, costituito da un corpo tabulare (piana interna) con facies lagunari, palustri e alluvionali, e da un corpo lenticolare (piana esterna e delta sommerso), con spessore massimo prossimo a 70 metri, con facies litorali, di fronte deltizio e di prodelta (BELLOTTI *et alii*, 1994). La subsidenza generale è pressochè trascurabile, sono però storicamente documentati locali ed episodici abbassamenti del terreno.

DELTA DEL FIUME VOLTURNO (fig. 7)

Si sviluppa nell'ampia insenatura compresa tra il promontorio di Gaeta e l'isola di Ischia che tiene lontana dalla costa la corrente tirrenica diretta verso NW e consente il generarsi di deboli vortici locali che invertono stagionalmente il verso di rotazione.

Superficie emersa

È ben distinguibile in due parti tanto per caratteri morfologici che Sedimentologici (CALIRO *et alii*, 1997; PAGLIUCA, 1998). La piana deltizia interna è costituita da un'area piatta per lo più compresa tra 0 e +3 m e interessata da opere di bonifica che l'hanno completamente prosciugata negli ultimi due secoli. Essa è caratterizzata da sedimenti limoso-fangosi, talvolta torbosi, più ricchi in sabbia in prossimità del canale fluviale del Volturno. Quest'ultimo risulta meandriforme fino a Castel Volturno e assume un andamento rettilineo da qui alla foce.

La piana deltizia esterna, compresa tra il Canale Agnena e i Regi Lagni, è ondulata per la presenza di cordoni costieri sabbiosi talvolta rielaborati dal vento. I cor-

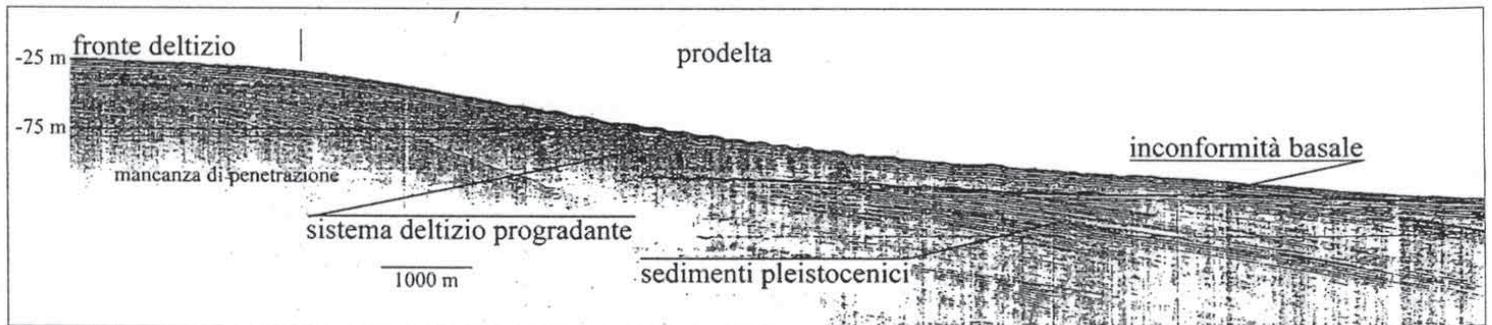
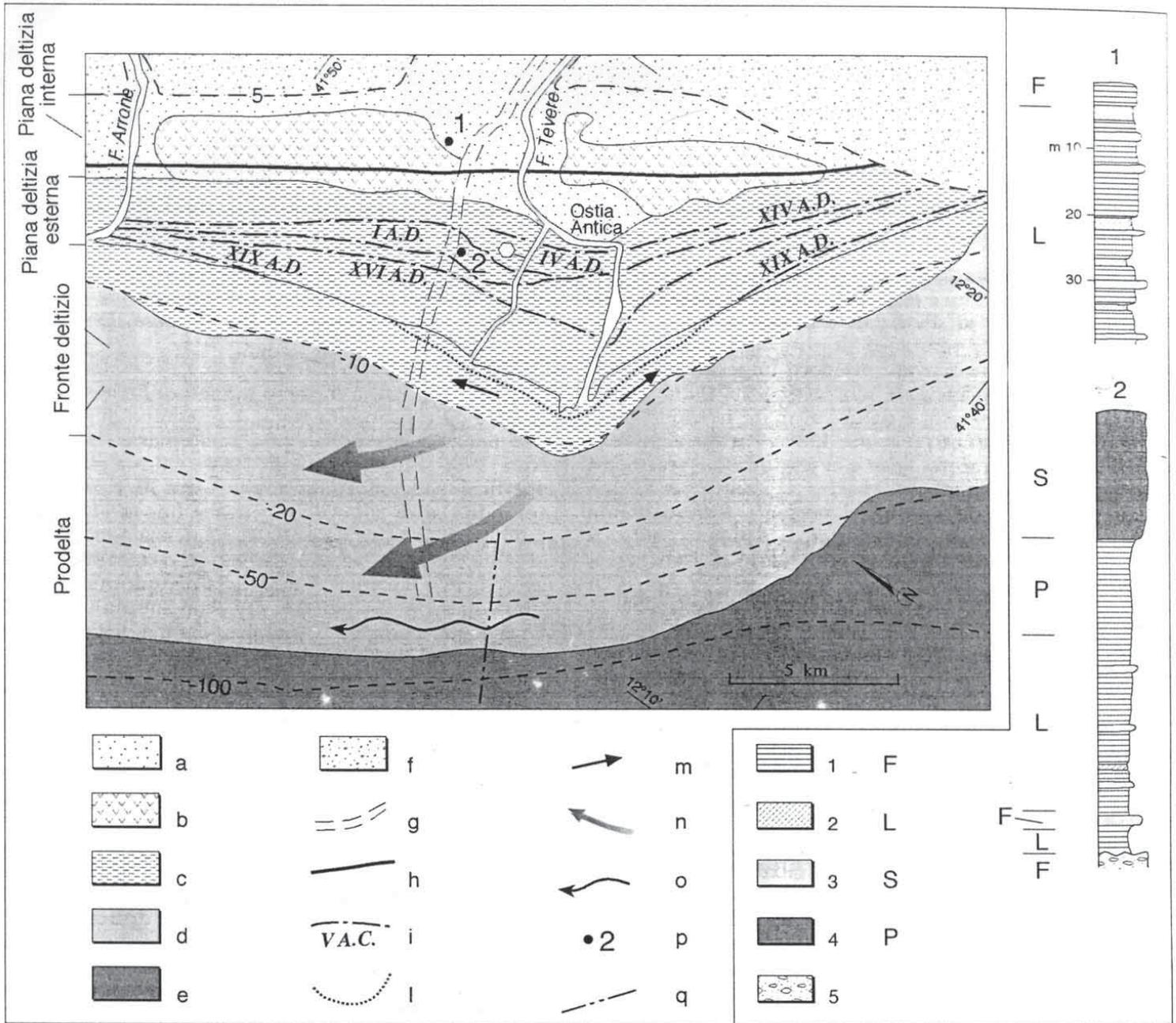


Fig. 6 - Lineamenti morfologici e sedimentologici del delta del Fiume Tevere: a) sabbie pelitiche alluvionali; b) peliti organiche palustro-lagunari; c) sabbie di spiaggia e localmente dunari; d) peliti di prodelta e fronte deltizio; e) argille di piattaforma; f) depositi pleistocenici; g) andamento del paleoalveo glaciale; h) linea di massima ingressione marina; i) linee di riva storiche; l) linee di riva erose; m) correnti lungo riva; n) andamento del plume; o) corrente costiera; p) ubicazione log stratigrafico; q) traccia profilo sismico; 1) peliti; 2) torbe; 3) sabbie pelitiche; 4) sabbie; 5) ghiaie sabbiose. F) depositi alluvionali; L) depositi lagunari; P) depositi di prodelta; S) depositi di spiaggia. - Morphologic and sedimentological features of the Tiber River Delta: a) alluvial sand and mud; b) marshy-lagoon organic mud; c) beach or dune sands; d) delta front and prodelta mud; e) shelf mud; f) pleistocene deposits; g) river channel during the sea level low stand; h) line of the maximum flooding; i) historical shoreline; l) lost shoreline; m) longshore drift; n) common plume trajectory; o) coastal current; p) stratigraphic log location; q) seismic line; 1) mud; 2) peat; 3) muddy sand; 4) sand; 5) sandy gravel. F) alluvial deposits; L) lagoon deposits; P) prodelta deposits; S) beach deposits.

doni più interni, attribuibili al periodo romano e preromano (Cocco *et alii*, 1992), sono paralleli tra loro con intersezione di classe A con il distributore. I più esterni mostrano un'intersezione di classe C con \hat{S} prossimo a 90° (XVIII-XIX secolo) e sono tagliati dall'attuale linea di costa che interseca l'asse del distributore con \hat{S} prossimo a 160° (classe B). La piana deltizia esterna risultava formata per oltre il 25% nel periodo imperiale romano e per circa il 40% nel Rinascimento. I massimi incrementi sembrano verificarsi nel XVIII secolo (fig. 4) mentre il forte decremento apicale, registrato in questo secolo, è in buona parte compensato dalla progradazione delle ali.

Fondali

Si presentano debolmente acclivi fino alla profondità di 20 m ($0^\circ.36$ tra 0 e -10 m; $0^\circ.16$ tra -10 e -20 m) per divenire poi più inclinati ($0^\circ.61$ tra -20 e -50 m; $0^\circ.46$ tra -50 e -100 m) fino a raccordarsi con profilo convesso-concavo alla piattaforma. Qui, intorno a 100-150 metri di profondità, le isobate si protendono verso mare similmente a quelle prossime alla foce attuale; ciò è attribuito (PENNETTA *et alii*, 1998) al corpo deltizio generato dal F. Volturno durante l'ultimo stazionamento basso. Il sedimento è francamente sabbioso in prossimità della costa (entro i primi 5 metri), limoso e limoso sabbioso oltre i -20 m (FERRETTI & SETTI, 1989; FERRETTI *et alii*, 1989).

Sottosuolo

Il sottosuolo della bassa pianura del Volturno è noto per un abbondante numero di perforazioni che consentono di ricostruire la sequenza deposizionale tarcoquaternaria. Questa è anche individuabile nelle non abbondanti registrazioni sismiche del delta sommerso. La superficie d'inconformità basale è segnalata nella piana deltizia a -40 m ed è identificabile a mare fino a -120 m, dove è presente un corpo sedimentario probabilmente relativo allo stazionamento basso. Nell'area del delta emerso (CALDERONI *et alii*, 1994; ROMANO *et alii*, 1994) il sistema trasgressivo è rappresentato, verso mare, da facies marine e di barriera costiera e, verso terra dai sedimenti di una baia-laguna che si spingeva probabilmente fin nei pressi di Cancellone. In mare, sono presumibilmente da attribuire al sistema trasgressivo parte dei sedimenti che poggiano sull'inconformità basale. La superficie di *maximum flooding* è localizzabile, sotto la superficie dell'attuale piana deltizia interna, a circa -8 m e s'inclina verso mare con pendenza media di $0^\circ.29$. Il corpo di stazionamento alto risulta principalmente tabulare nella parte più interna, dove è costituito da facies lagunari, palustri e alluvionali; la restante parte mostra una geometria lentiforme con facies litorali, di fronte deltizia e di prodelta. In questo sistema deltizio ha avuto un ruolo importante l'attività vulcanica. L'Ignimbrite Campana, messa in posto tra 42000 e 27000 anni fa, ha sensibilmente influenzato la morfologia dell'area durante l'ultima caduta e il successivo basso stazionamento del livello marino fornendo un surplus di materiale per la costruzione del *low stand system tract*. Le Piroclastiti flegree, periodicamente deposte durante la deglaciazione e fino a periodi storici recenti, hanno fornito materiale durante la trasgressione e il successivo colmamento della laguna e delle aree palustri. La subsidenza olocenica nella piana deltizia sembra generalmente ridotta (circa 1 mm/a) ma in alcune aree (es. Sinuessa e Lago Patria) tali valori sono probabilmente maggiori.

IL MODELLO DELTIZIO TIRRENICO

Le aree esaminate hanno subito profonde trasformazioni negli ultimi 20000 anni durante i quali si sono sviluppate sequenze deposizionali del V ordine (BELLOTTI *et alii*, 1994). In assenza di una tettonica particolarmente attiva, le trasformazioni sono state indotte dal discontinuo sollevamento eustatico del livello marino e dall'apporto sedimentario fluviale al quale, limitatamente all'area del Volturno, si è aggiunto quello piroclastico. La linea di riva che si trovava circa 120 m più in basso dell'attuale durante il massimo glaciale, ha raggiunto una quota prossima a quella odierna circa 6000 anni fa. Da quel momento inizia alla foce dei maggiori fiumi tirrenici lo sviluppo di corpi sedimentari complessi che identificano i relativi sistemi di stazionamento alto della sequenza deposizionale di V ordine. Tali corpi, simili per caratteri morfologici, sedimentologici, stratigrafici ed evolutivi rappresentano un particolare modello deltizio ben sviluppato sulla costa tirrenica ma probabilmente, di questa, non esclusivo.

Il substrato

Il substrato degli apparati deltizi tirrenici è costituito dal sistema trasgressivo generatosi durante la risalita glacioeustatica. Verso mare, tale sistema può non avere espressione fisica, laddove la *maximum flooding* coincide con l'inconformità basale, o può essere rappresentato da discontinui lag basali o da più consistenti riempimenti della parte distale delle paleovalle (fig. 8). Quest'ultimo caso, pur non essendo testimoniato nelle aree deltizie considerate per l'opacità acustica dei sedimenti deltizi regressivi, è noto nelle piattaforme antistanti le foci fluviali che oggi non sviluppano apparati deltizi. I massimi spessori del sistema trasgressivo si registrano sotto le piane deltizie. Qui sono ben sviluppati, all'interno delle paleovalle, i sistemi barriera-laguna migranti verso terra con meccanismi diversi (*in place drowning; shoreface retreat*) in funzione del tasso di sollevamento del livello marino e del rifornimento sedimentario dal continente. Nella laguna si sviluppavano corpi fluvio-deltizi, ghiaiosi o sabbiosi in funzione delle caratteristiche idrauliche del fiume, che progradavano nei momenti di quasi stabilità del livello marino o di maggior apporto fluviale e venivano sommersi durante le fasi di maggior risalita del livello del mare (BELLOTTI *et alii*, 1994; 1995; 2000).

Lineamenti morfologici

a) *Piana deltizia*: intesa come superficie non sottomarina del delta, è ben differenziabile in interna ed esterna. La prima presenta un aspetto piatto, con quote prossime al livello del mare, talvolta inferiori, ed è stata a lungo sede di bacini palustri oggi in gran parte bonificati. La seconda è caratterizzata da dune e cordoni costieri che le conferiscono un aspetto ondulato. Le zone rilevate raggiungono normalmente 2-5 metri di quota ma, localmente, superano anche i 10 metri. Nelle zone depresse sono talvolta presenti aree umide, periodicamente sommerse, o piccoli bacini salmastri la cui vita può essere d'ordine secolare. L'andamento dei cordoni scandisce i ritmi della progradazione (INNOCENZI & PRANZINI, 1993; BELLOTTI *et alii*, 1989; COCCO *et alii*, 1992).

b) *Canale distributore naturale*: è sempre singolo, nella piana deltizia interna presenta andamento più o meno

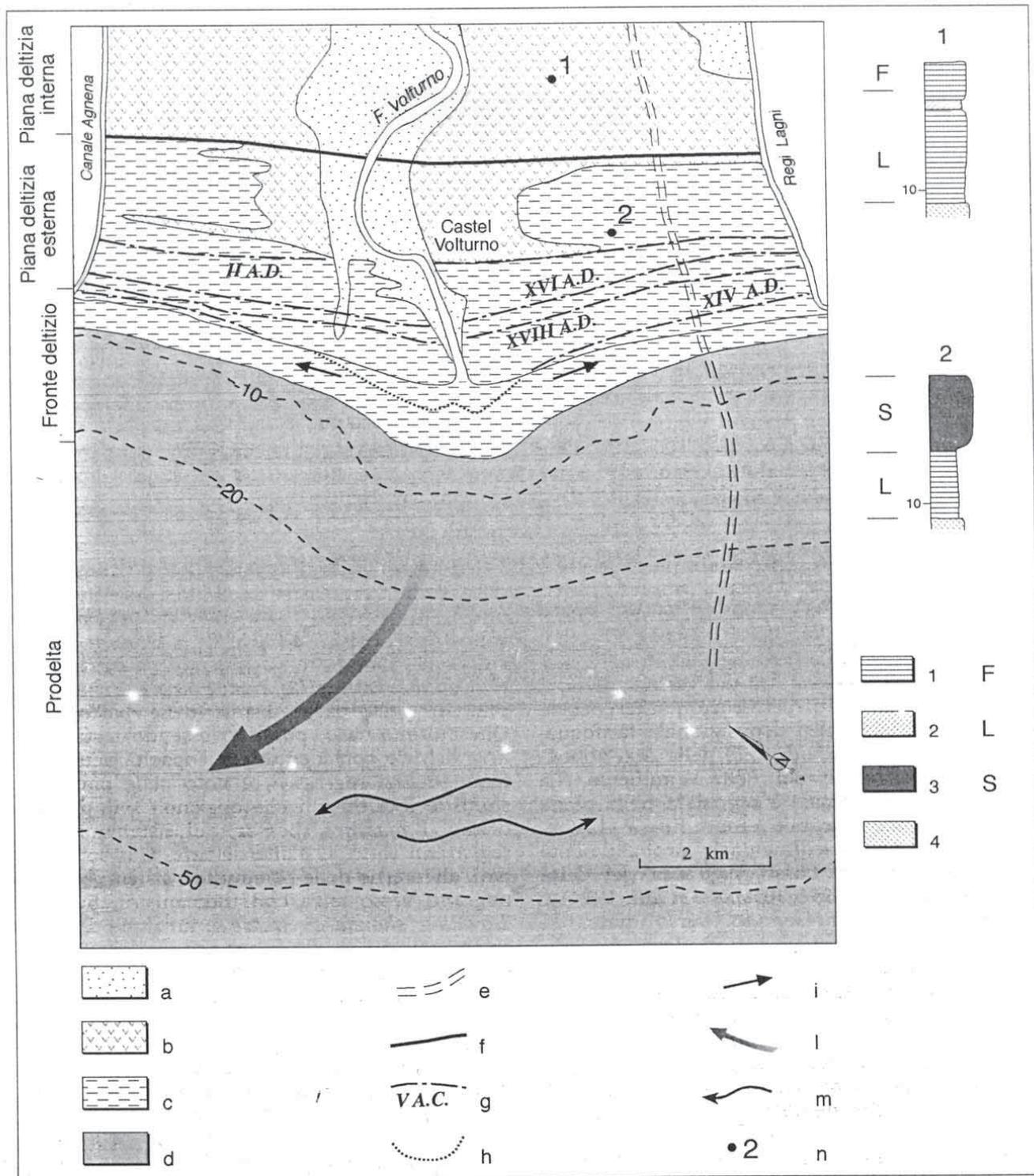


Fig. 7 - Lineamenti morfologici e sedimentologici del delta del Fiume Volturno: a) sabbie pelitiche alluvionali; b) peliti organiche palustro-lagunari; c) sabbie di spiaggia e localmente dunari; d) peliti di fronte deltizio e prodelta; e) probabile andamento del paleoaveo glaciale; f) linea di massima ingressione marina; g) linee di riva storiche; h) linee di riva erose; i) correnti lungo riva; l) andamento del plume; m) corrente costiera; n) ubicazione log stratigrafico; 1) peliti; 2) torbe; 3) sabbie; 4) vulcanoclastiti. F) depositi alluvionali; L) depositi lagunari; S) depositi di spiaggia.

- Morphologic and sedimentological features of the Volturno River Delta: a) alluvial sand and mud; b) marshy-lagoon organic mud; c) beach or dune sands; d) delta front and prodelta mud; e) river channel during the sea level low stand; f) line of the maximum flooding; g) historical shoreline; h) lost shoreline; i) longshore drift; l) common plume trajectory; m) coastal current; n) stratigraphic log location; 1) mud; 2) peat; 3) sand; 4) vulcanoclastic deposits. F) alluvial deposits; L) lagoon deposits; S) beach deposits.

sinuoso; in quell'esterna è per lo più rettilineo e privo d'argini naturali.

c) *Fronte deltizio*: generalmente esteso tra riva e -20/-25 metri è ben identificabile dalla protrusione in mare delle isobate. Presenta una parte interna, normalmente limitata dall'isobata -5 m, caratterizzata dalla presenza

della barra di foce e di barre litorali sommerse. La parte più esterna è più ampia con fondali piatti e poco acclivi.

d) *Prodelta*: è l'area con fondali più acclivi, si estende dal fronte deltizio con profilo convesso raccordandosi alla piattaforma con profilo concavo. Negli apparati con acclività attorno a 1° sono presenti fenomeni d'instabilità gravitativa.

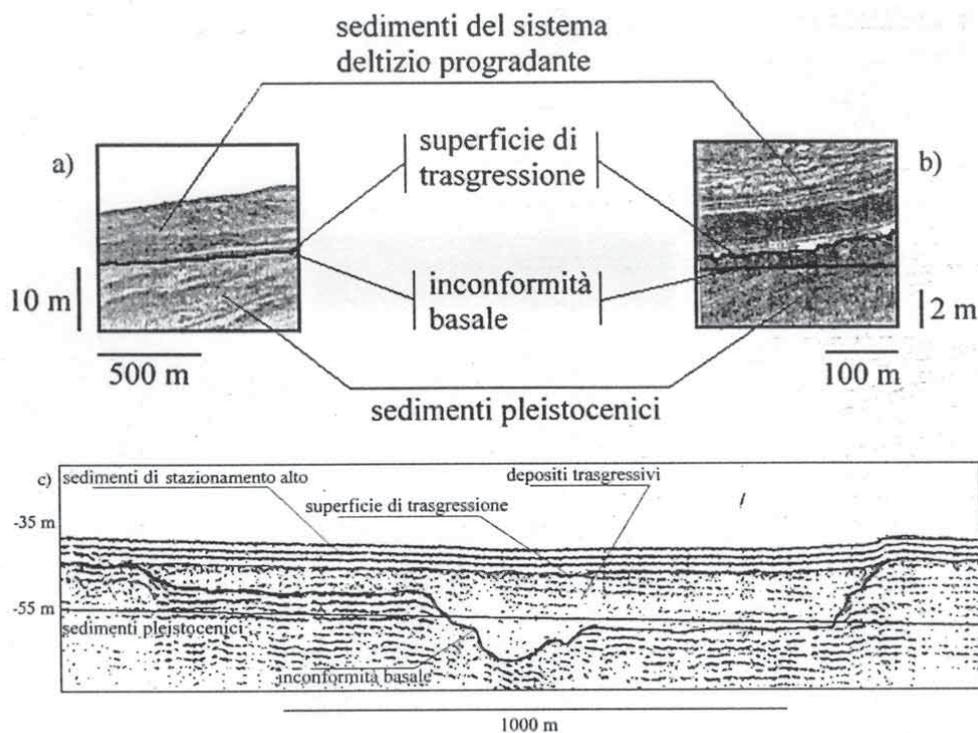


Fig. 8 - Espressione del sistema trasgressivo nelle aree marine antistanti le foci fluviali: a) nulla, *maximum flooding* coincidente con l'inconformità basale (delta del F. Tevere); b) irregolare, *maximum flooding* poco discosta dall'inconformità basale (delta del F. Tevere); c) ben sviluppata, all'interno della paleovalle (registrazione normale alla paleovalle del Fiume Fiora modificata da TORTORA, 1989). Quest'ultimo caso non è testimoniato nelle aree deltizie per l'opacità acustica dei sedimenti nell'area del fronte deltizio. - *Transgressive system tract aspect in front of the river mouths: a) null, maximum flooding and basal unconformity are coincident (Tiber Delta); b) irregular, maximum flooding close by basal unconformity (Tiber Delta); c) developed into the paleovalley (seismic line normal to Fiora River paleovalley after TORTORA, 1989).*

Il delta del Fiume Arno si differenzia attualmente dagli altri apparati, per i punti (c) e (d). Le isobate sono pressochè parallele alla linea di riva e, anziché una tipica morfologia deltizia, s'individua quella di una spiaggia sommersa che si raccorda con la piattaforma attraverso fondali a debole acclività.

Distribuzione dei sedimenti

Esiste una buona corrispondenza tra unità morfologiche e distribuzione superficiale dei sedimenti. Nella piana deltizia interna dominano i fanghi più o meno limoso-argillosi talvolta con torba, mentre le sabbie, generalmente limoso-fangose, sono relegate in prossimità del canale fluviale attivo o di quelli abbandonati. Nella piana deltizia esterna sono presenti sabbie per lo più da medio a fini ben selezionate; esse costituiscono i cordoni e gli accumuli eolici. Subordinati sono i fanghi più o meno organici, limitati alle zone umide e ai piccoli effimeri bacini nelle depressioni tra i cordoni. Anche il fronte deltizio interno è dominato da sabbie ben selezionate da fini a grossolane. In quello esterno prevalgono sabbie limose e limi più o meno sabbiosi e sono talvolta presenti aree generalmente a sedimentazione più sottile. Il prodelta è dominato dai fanghi, più limosi verso terra e più argillosi verso il largo; locali aree a sedimentazione più grossolana possono essere presenti in prossimità del fronte deltizio.

Evoluzione

La distribuzione superficiale dei sedimenti e la zonazione morfologica risente, oltre che dell'attuale dinamica deltizia, dell'evoluzione del sistema avvenuta a partire dalla stabilizzazione del livello marino quando il contesto

paleogeografico era caratterizzato da un'ampia laguna bordata verso mare da una sottile barriera. L'evoluzione può essere divisa in due fasi; nella prima si è sviluppato il protodelta (o delta lagunare), nella seconda il delta marino. Il passaggio tra le due fasi è dato dalla traslazione del depocentro dall'interno della laguna (I fase) all'esterno della barriera (fase attuale), tale evento sembra essersi verificato circa 2500-3000 anni fa (MARINELLI, 1926; MIKHAILOVA *et alii*, 1998).

Sviluppo del protodelta

La laguna presente 6000 anni fa era profonda qualche metro e collegata con il mare attraverso alcune aperture nella barriera che rappresentava l'ultima spiaggia del sistema trasgressivo. All'interno della laguna era posta la foce fluviale dalla quale proveniva il sedimento siltoso-argilloso con subordinata frazione sabbiosa. Il sedimento rimaneva quasi totalmente intrappolato nella laguna e solo una limitata frazione sottile si disperdeva in mare attraverso le aperture nella barriera. Si creavano in tal modo dei corpi deltizi lagunari (BRAVETTI & PRANZINI, 1987; BELLOTTI *et alii*, 1989; BELLOTTI *et alii*, 1998), e la laguna diminuiva man mano la sua profondità. In questa fase la barriera non essendo alimentata dalle sabbie fluviali non subiva significative evoluzioni.

Analoghe situazioni si sono verificate in altre aree come ad esempio le coste del Brasile (SUGUIO & MARTIN, 1981) o sono attualmente in evoluzione (foce del Verk Angara nel Baikal settentrionale). Lungo le coste italiane ancora oggi alcuni fiumi minori avrebbero foci lagunari (es. F. Sile nella Laguna Veneta, F. Chiarone nel L. di Burano) se non fossero stati artificialmente deviati.

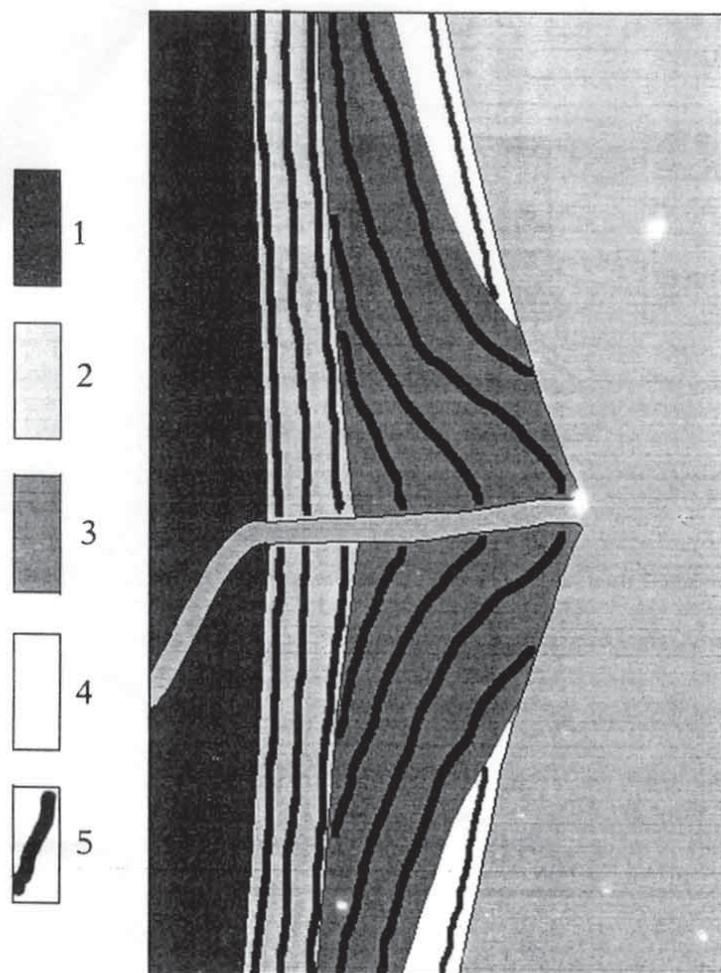


Fig. 9 - Meccanismi di progradazione riconosciuti nei delta tirrenici. Nel primo tipo il depocentro delle sabbie è disposto lungo la battigia, nel secondo tipo è ubicato nell'area di foce, nell'ultimo è spostato lungo le ali. 1) piana deltizia interna, 2) progradazione di primo tipo, 3) progradazione di secondo tipo, 4) progradazione di terzo tipo, 5) cordoni litorali.

- Progradation mechanisms in tyrrhenian deltas. In the first type sand depocenter is located long the shoreline, in the second one sand depocenter is close by river mouth, in the last type sand depocenter is located long delta wings. 1) Inner delta plain, 2) first type progradation, 3) second type progradation, 4) third type progradation, 5) beach ridges.

SVILUPPO DEL DELTA MARINO

Il delta marino inizia a svilupparsi solo dopo la saldatura del corpo deltizio lagunare con la barriera costiera; in queste condizioni gran parte del sedimento fluviale si depone in mare e la laguna risulta alimentata soltanto nelle fasi alluvionali. In virtù della preponderante quantità di limo prodotto dai fiumi in questione, il depocentro principale si posiziona su fondali di 20-30 metri dove il limo, trasportato sul plume ipopicnico, può depositarsi risentendo limitatamente dell'effetto del moto ondoso sul fondale. Contemporaneamente il depocentro delle sabbie fluviali si ubica sul lato esterno della barriera. Questa inizia a progredire per giustapposizione di nuovi cordoni litorali, al cordone che costituiva l'ultima spiaggia del sistema trasgressivo. La progradazione mostra una certa complessità messa in evidenza dal tipo d'intersezione tra asse dei cordoni costieri, e asse del distributore (fig. 2) nonché dai rapporti angolari tra i cordoni stessi. Si individuano tre diversi meccanismi di

progradazione (fig. 9) che sono in qualche modo legati alla relazione tra carico fluviale (F) ed energia del moto ondoso (W) (WRIGHT & COLEMAN, 1973).

Il primo meccanismo (intersezione in classe A e cordoni tra loro paralleli) agisce per valori moderati di F/W. Il depocentro delle sabbie è rappresentato da tutto il bordo esterno della barriera e la linea di riva avanza parallelamente a se stessa generando una piana deltizia priva della tipica geometria aggettante del delta.

Attualmente il delta dello Shoalhaven River nel New South Wales prograda con questo meccanismo (WRIGHT, 1970).

Il secondo meccanismo (intersezione in classe C e cordoni divergenti verso l'asse del distributore) è attivo per valori elevati di F/W. Il depocentro delle sabbie è nell'area di foce, che avanza rapidamente, creando una cuspid deltizia.

Il terzo meccanismo (intersezione in classe B e cordoni divergenti verso le ali) si attiva solo quando nel delta con pronunciata geometria cuspidata, F/W diminuisce sensibilmente. Il depocentro delle sabbie si sposta dall'area di foce verso le ali, l'apice viene smantellato e s'innescia la progradazione delle ali che può o no compensare la perdita apicale. L'azione di questo meccanismo trasforma un delta cuspidato in uno arcuato e il suo protrarsi può rettificare completamente la cuspid preesistente.

Nei primi due meccanismi, all'aumentare della lunghezza del distributore corrisponde un più o meno marcato incremento della superficie emersa; nel terzo, all'evidente diminuzione della lunghezza del distributore non corrisponde un pari decremento dell'area emersa. Al variare del meccanismo di progradazione anche la geometria del fronte deltizio si modifica similmente a quella della piana deltizia esterna (BARTOLINI & PRANZINI, 1985).

Il delta marino si è sviluppato attraverso il primo meccanismo solo nella fase iniziale, mentre gli altri due si sono alternati a partire dall'Epoca Romana. Fino al XV secolo, lo sviluppo della parte emersa risulta del 35-55% nei diversi apparati mentre il suo massimo valore si è ovunque raggiunto tra il XVIII e la metà del XX secolo. Quest'ultima intensa fase di progradazione è leggermente sfasata nei quattro delta con avvio e termine precoce per l'Arno e ritardato per il Volturno (fig. 4).

CONSIDERAZIONI SULLA DINAMICA EVOLUTIVA

Il tempo necessario allo sviluppo del protodelta sembra essere stato simile a quello impiegato per lo sviluppo del delta marino. Considerando i limitati spessori del primo e quelli nettamente maggiori del secondo, si deve supporre che nei primi 2500-3000 anni successivi, alla stabilizzazione del livello del mare, i fiumi portarono alla foce un volume di sedimenti assai inferiore a quello portato nei successivi 3000 anni.

Non essendo note differenze, tra i due periodi, nell'attività tettonica appenninica, il diverso comportamento dei fiumi va imputato a fatti climatici e idrodinamici. In effetti, durante l'*optimum* climatico (6-4 ka BP) c'erano le condizioni per un ampio sviluppo della copertura vegetale mentre l'inizio del successivo periodo subboreale (4-3 ka BP) fu caratterizzato da un generale inaridimento (LEONI & DAI PRA, 1997); eventi questi che sfavorirono la produzione di sedimenti. A ciò va aggiunto

che in quei periodi i fiumi dovettero riequilibrare i loro profili, alterati dal precedente sollevamento eustatico del livello marino, depositando in abbondanza all'interno della valle alluvionale.

I diversi ritmi della progradazione del delta marino presentano un certo sincronismo con le variazioni climatiche. L'esistenza nell'Olocene di periodi fresco-umidi e caldo-aridi, già nota da tempo, è stata recentemente confermata, per l'area mediterranea, anche nel periodo successivo all'*optimum climatico* (CAMUFFO & ENZI, 1994; LEONI & DAI PRA, 1997; ORTOLANI & PAGLIUCA, 1993; 1997).

Nei delta esaminati l'arretramento dell'apice deltizio e la progradazione delle ali sembrano essere stati attivi nel periodo caldo medioevale (INNOCENTI & PRANZINI 1993; BELLOTTI *et alii*, 1994) e negli ultimi due secoli in coincidenza con un riscaldamento climatico. La progradazione della foce e l'incremento della superficie emersa sono localmente testimoniati, anche da fonti storiche (PROCOPIO *op. cit.*), durante l'alto Medio Evo; essi appaiono tuttavia più evidenti durante la piccola età glaciale (XVI-XVIII secolo) in cui vi fu, alle nostre latitudini, un significativo incremento della piovosità. Va considerato che il rapporto tra le variazioni di piovosità e disponibilità di sedimento alla foce non è lineare. Per il F. Tevere è stato osservato (BERSANI & PIOTTI, 1994) che il trasporto torbido è poco più che trascurabile per portate $<350 \text{ m}^3/\text{s}$ mentre aumenta rapidamente, oltre tale valore critico, caratterizzandosi per la messa in sospensione dell'intera frazione sabbiosa per portate vicine a $700 \text{ m}^3/\text{s}$. Ne consegue che si avrà un grande incremento della quantità di sedimento alla foce anche per limitati incrementi delle precipitazioni purché queste producano il superamento della portata critica. Questo, inoltre, avrà una tessitura più grossolana e tenderà a costituire barre di foce più stabili. Alla fine del XIX secolo il F. Tevere aveva portata media annua di $264 \text{ m}^3/\text{s}$ e le relative portate medie mensili risultavano inferiori al valore critico di $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Ammettendo che l'aumento della piovosità durante la piccola età glaciale avesse causato un incremento delle portate medie annue di circa il 30%, le portate medie mensili avrebbero superato il valore critico per ben sei mesi l'anno giustificando un ampio incremento del trasporto solido.

Le variazioni del rapporto F/W non possono tuttavia essere imputate ai soli fattori climatici trascurando l'azione dell'uomo (ALESSANDRO *et alii*, 1990) che con bonifiche, disboscamenti e prelievi in alveo ha sensibilmente alterato in diversi periodi storici il valore di F, in particolare le regimazioni sviluppate nell'ultimo secolo, regolando gli eventi di piena, hanno limitato fortemente il trasporto solido.

DINAMICA ATTUALE

I processi idrodinamici alla foce sono caratterizzati dalla presenza dei deflussi ipopicnici con formazione di un cuneo salino che risale nel distributore nelle fasi di magra ed è inesistente per le portate maggiori (per il F. Tevere, il cuneo salino è assente per portate $>820 \text{ mc/s}$). Il sedimento più grossolano, influenzato da processi inerziali e di frizione, tende a depositarsi all'interno del distributore o in prossimità della foce. Quello più sottile segue le acque fluviali, meno dense che quelle marine, e si allontana dalla foce su un più o meno esteso plume. La

miscelazione del plume con le acque marine, regolata in gran parte dallo stato del mare, favorisce la flocculazione e la deposizione del materiale fine che rimane più o meno stabile su fondali di profondità maggiore a quella del comune livello di base delle onde. Concentrazioni di sedimento nelle acque fluviali tali da giustificare flussi iperpicnici sono testimoniate per il F. Ombrone (LUIGGI, 1914) e forse a ciò è legata la particolare distribuzione delle sabbie alla foce di questo fiume. Fenomeni gravitativi lenti, tendenti a spostare a maggiori profondità il sedimento già deposto sui fondali di prodelta, sono noti solo per gli apparati che presentano le maggiori acclività (Ombrone e Tevere).

Questi processi idrodinamici consentono lo sviluppo di un fronte deltizio, ampio e poco acclive, ove il moto ondoso rielabora occasionalmente e distribuisce il sedimento fluviale grossolano che ivi si deposita. Consentono altresì lo sviluppo di un prodelta, con maggiori acclività, che rappresenta un'area d'accumulo passivo del sedimento fine (fatta eccezione per i moti gravitativi lenti o per quelli eventualmente legati ai subordinati deflussi iperpicnici).

La piana deltizia interna è attualmente alimentata dal fiume solo durante le fasi di tracimazione oggi, peraltro, assai limitate dagli argini artificiali e dall'approfondimento dell'alveo conseguente alle massicce estrazioni di inerti. Quella esterna, riceve un trascurabile apporto di sedimento direttamente dal canale fluviale ed è sede di un limitato trasporto di sabbie per azione eolica. La dinamica è qui principalmente caratterizzata dalle correnti lungo riva che smistano, verso le ali, i sedimenti di foce. Attualmente, a causa del basso valore degli apporti fluviali, parte del materiale deposto lungo le ali deriva dall'erosione dell'apice. Per l'Arno sembrerebbe più corretto parlare di totale latenza del delta non mostrando questo, attualmente, né una chiara morfologia deltizia né un'adeguata dinamica; esso si configura, dunque, come un apparato fortemente sottoalimentato la cui esistenza è testimoniata solo dalla geometria dei cordoni costieri.

L'efficacia del moto ondoso e le basse pendenze del modello deltizio tirrenico rendono quest'ultimo altamente sensibile alle variazioni dell'apporto fluviale e del livello marino. Rispetto alla fase attuale, l'incremento di F tenderebbe a ripristinare il secondo meccanismo di progradazione mentre, la sua ulteriore diminuzione causerebbe dapprima una completa rettificazione della linea di riva e successivamente il parziale smantellamento del delta. L'attuale tendenza climatica non sembra favorire la prima possibilità facendo altresì paventare un sollevamento del livello marino. Un sollevamento di 30-40 cm nel prossimo secolo (tasso triplo rispetto all'attuale) non agirebbe soltanto in prossimità della linea di riva ma incrementerebbe l'intrusione del cuneo salino, favorirebbe la sedimentazione in alveo (MIKHAILOV, 1993) e l'inondabilità delle aree più depresse del delta. Il sollevamento interagirebbe inoltre con le falde dell'area deltizia e causerebbe seri danni agli impianti di bonifica con conseguenti parziali sommersioni della piana deltizia interna.

CONCLUSIONI

Il modello deltizio tirrenico si inquadra nei «*wave dominated delta*» a distributore singolo ed è in parte assimilabile al tipo «D» di POSTMA (1995). Esso si sviluppa, dopo la stabilizzazione del livello marino, su un margine

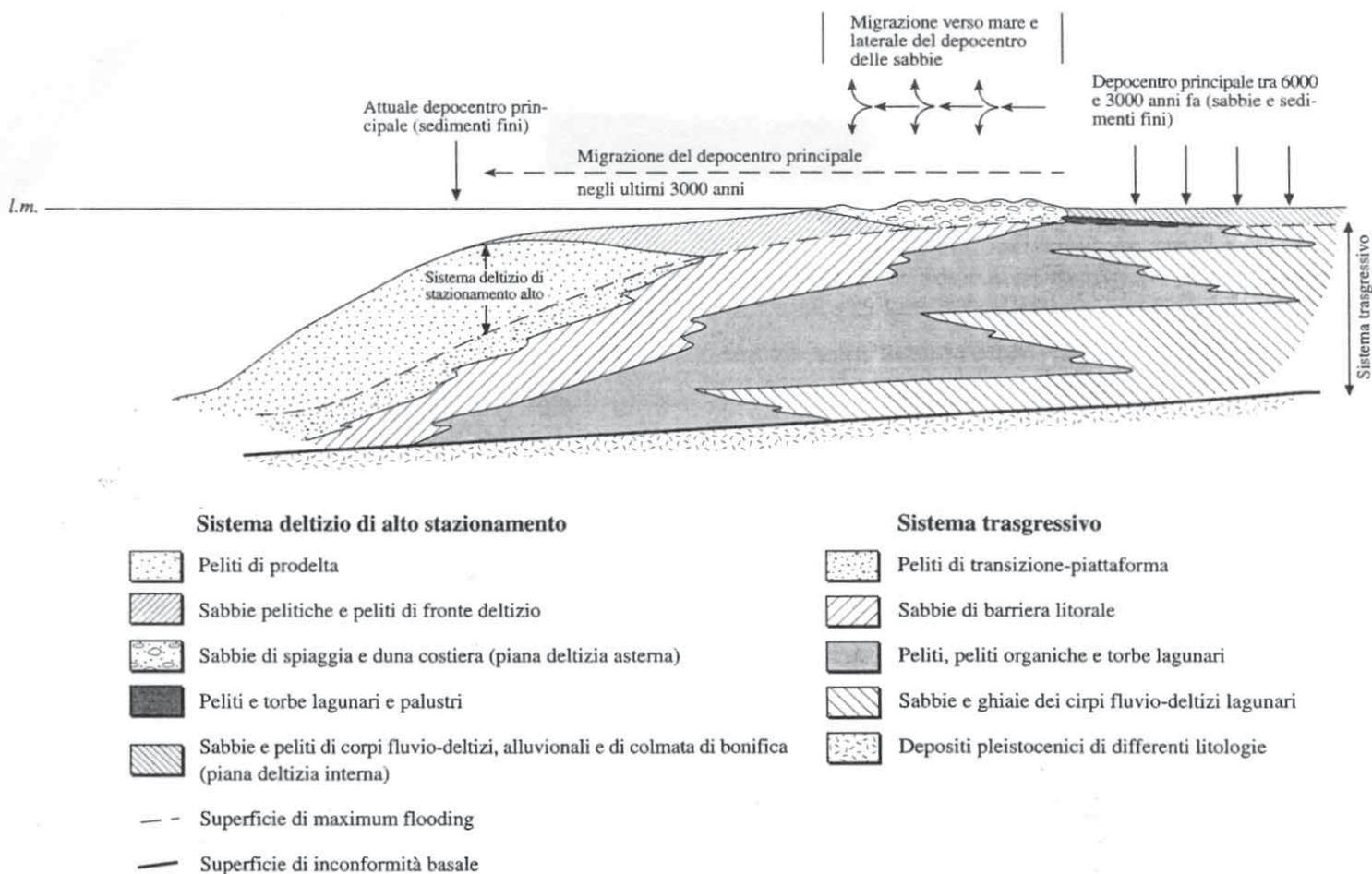


Fig. 10 - Schema generale dell'architettura del modello deltizio tirrenico. Il sistema trasgressivo rappresenta il substrato del corpo deltizio sviluppatosi durante lo stazionamento alto del livello marino; la sua geometria è caratterizzata, verso l'interno, da una porzione tabulare di ridotto spessore e da una lentiforme esterna con spessori maggiori.
 - General scheme of the tyrrhenian delta model. Delta body lies on the trasgressive system tract. Delta body is constituted, in the inner part, by thin tabular body and, seaward, by a thick lenticular body.

passivo caratterizzato da piattaforme ampie e poco acclivi scarsamente interessate dalla subsidenza.

Il corpo deltizio presenta una geometria composta (fig. 10). Esso è costituito verso terra, da un corpo tabulare a prevalente composizione pelitica, sottile ma arealmente ben sviluppato, corrispondente al riempimento della paleo-laguna. Verso mare, è presente uno spesso corpo lentiforme sabbioso pelitico, corrispondente al delta marino. La parte emersa appare nettamente bipartita in piana deltizia interna ed esterna; esse differiscono per genesi, caratteri morfologici, sedimentologici e dinamica sedimentaria.

Il depocentro principale è ubicato tra il limite esterno del fronte deltizio e la parte alta del prodelta, in esso si deposita gran parte del materiale fine che rimane nel sistema deltizio. Depocentri secondari sono rappresentati dalla fascia litorale e dalla piana deltizia interna. Nella prima, si depone il materiale più grossolano, in particolare quando si verificano frequenti e importanti eventi di piena; nella seconda si depositano limitate quantità di sedimento esclusivamente per eventi di tracimazione.

Questo tipo di configurazione risulta estremamente sensibile alle variazioni ambientali; in particolare la fascia limitrofa alla battigia soffrirebbe in condizioni di ridotto apporto fluviale mentre per un sollevamento relativo del livello marino anche la piana deltizia interna rappresenterebbe una zona particolarmente fragile.

RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia P. Tortora per la collaborazione fornita per l'organizzazione del testo; C. Caputo e L. Davoli per la revisione del manoscritto.

OPERE CITATE

- AIELLO E., BARTOLINI C., CAPUTO C., D'ALESSANDRO L., FANUCCI F., FIERRO G., GNACCOLINI M., LA MONICA G.B., LUPIA PALMIERI E., PICCAZZO M. & PRANZINI E. (1975) - *Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana tra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina*. Boll. Soc. Geol. It., **94**, 1519-1571.
- ALESSANDRO V., BARTOLINI C., CAPUTO C. & PRANZINI E. (1990) - *Land use impact on Arno, Ombrone and Tiber deltas during historical times*. In: Quélenec, R.E. Ercolani & G. Michon eds. Littoral 1990, Eurocoast, Chateau-Gombert, Marseille (France) 9-13 July 1990, 261-265.
- ALESSIO M., BARBIERI M., BELLOTTI P., BELLUOMINI G., BERGAMINI L., BRANCA M.E., CAPUTO C., CARBONI M.G., CASTORINA F., CELIA MAGNO M., CHIOCCI F.L., CONTI M.A., D'ALESSANDRO L., DEL MONTE M., DAVOLI L., DI BELLA L., EVANGELISTA S., FREDI P., GARZANTI F., IMPROTA S., LA MONICA G.B., LANDINI B., MANFRA L., MONARI S., PUGLIESE F., RAFFI R., TOMMASI P., TORTORA P., VALERI P. & VOLTAGGIO M. (1997) - *Marine researches along the continental shelf in the central Tyrrhenian Sea - the Ombrone River Delta project*. Abs. of: International Conference «Progress in Oceanography of the Mediterranean Sea», Rome 17/19-November-1997. 263-264.

- ASTRALDI M., BACCIOLA D., BORGHINI M., DELL'AMICO F., GALLI C., GASPARINI G.P., LAZZONI E., NERI P.L. & RASO G. (1993) - *Caratteristiche stagionali delle masse d'acqua nell'arcipelago Toscano*. In: Arcipelago Toscano. Ed. S.Furia ENEA, 7-28.
- BARBIERI M., BELLOTTI P., BELLUOMINI G., BERGAMIN L., BRANCA M., CAPUTO C., CARBONI M.G., CASTORINA F., CHIOCCI F.L., CONTI S., DAVOLI L., DI BELLA L., EVANGELISTA S., FREDI P., LA MONICA G.B., LANDINI B., MANFRA L., MONARI S., PUGLIESE F., RAFFI R., TORTORA P., TOMMASI P., VALERI P. & VOLTAGGIO M. (1997) - *Processi deposizionali in atto in ambiente costiero. Il caso del bacino dell'Ombrone-piattaforma toscana meridionale*. Atti del IX Congresso Nazionale dei Geologi Risorse e sviluppo prospettive per il XXI secolo. Roma 17-20/aprile/1997.
- BARTOLINI C. (1983) - *Riduzione dell'apporto solido dei corsi d'acqua ed erosione dei litorali: Il caso del Cecina e quello dell'Ombrone*. Atti XXIII Congr. Geogr. It. Catania, 9-13 maggio 1983, 2 (3), 91-102.
- BARTOLINI C. & PRANZINI E. (1985) - *Fan-delta erosion in southern Tuscany as evaluated from hydrographic surveys of 1883 and late 1970's*. Marine Geology, 62, 181-187.
- BELLOTTI P., CAPUTO C., DAVOLI L., EVANGELISTA S., GARZANTI E., MORETTI FOGGIA F. & VALERI P. (2000) - *La piana delizia del Fiume Ombrone (Maremma toscana): morfologia-tessitura e composizione dei sedimenti-architettura del sottosuolo*. Atti del Convegno sulla salvaguardia delle pianure costiere. Ferraia 8-11/11/1999, in stampa.
- BELLOTTI P., CAPUTO C., DAVOLI L., EVANGELISTA S. & VALERI P. (1999) - *Lineamenti morfologici e sedimentologici della piana delizia del Fiume Ombrone (Toscana Meridionale)*. Boll. Soc. Geol. It., 118, 141-147.
- BELLOTTI P., CARBONI M.G., MILLI S., TORTORA P. & VALERI P. (1989) - *La piana delizia del Fiume Tevere: analisi di facies e ipotesi evolutiva dall'ultimo low-stand glaciale all'attuale*. Giornale di Geologia, 51 (1), 77-91.
- BELLOTTI P., CHIOCCI F.L., MILLI S., TORTORA P. & VALERI P. (1994) - *Sequence stratigraphy and depositional setting of the Tiber Delta: integration of high-resolution seismics, well-logs, and archeological data*. Journ. Sedim. Res., 64 (B), 416-432.
- BELLOTTI P., MILLI S., TORTORA P. & VALERI P. (1995) - *Physical stratigraphy and sedimentology of the late Pleistocene-Holocene Tiber Delta depositional sequence*. Sedimentology, 42, 627-634.
- BELLOTTI P. & TORTORA P. (1996) - *I sedimenti sul fondale del delta del Fiume Tevere*. Boll. Soc. Geol. It., 115, 449-458.
- BELLUOMINI G., IUZZOLINI P., MANFRA L., MORTARI R. & ZALAFFI M. (1986) - *Evoluzione recente del Delta del Tevere*. Geologica Romana, 25, 213-224.
- BERSANI P., BENCIVENGA M. & PIOTTI A. (1999) - *Caratterizzazione degli eventi di piena del Fiume Tevere a Roma dal 1921 al 1995*. L'Acqua, 1-2, 1999, 25-36.
- BERSANI P. & PIOTTI A. (1994) - *Correlazioni tra portata liquida e trasporto solido del Fiume Tevere a Foma*. Idrotecnica, 2, 69-78.
- BRAVETTI L. & PRANZINI G. (1987) - *L'evoluzione quaternaria della Pianura di Grosseto (Toscana): prima interpretazione dei dati del sottosuolo*. Geogr. Fis. Din. Quater., 10, 85-92.
- CALDERONI G., DE GENNARO M., ORTOLANI F., PAGLIUCA S., ROLANDI G. & TOCCACELI R.M. (1994) - *Evoluzione geologica e morfologica olocenica di aree costiere della Campania*. Atti 77° Riunione estiva Congr. Naz. Soc. Geol. It., 167-170.
- CALIRO S., FRANZESE G., GALATERI C., GALATERI G., IMPERATO M., MILIA A., MONETTI V., NARDI G., ORTOLANI F., PAGLIUCA S., STANZIONE D. & TOCCACELI R.M. (1997) - *L'area urbana di Napoli: principali caratteristiche geologiche stratigrafiche ed ambientali*. Atti Conv. «Geologia delle grandi Aree Urbane» Vol. B. Bologna 4/5-Novembre-1997
- CAMUFFO D. & ENZI S. (1994) - *Cambiamenti climatici negli ultimi 2000 anni*. Il Quaternario, 7, 257-286.
- COCCO E., CARIMACO L. & DE MAGISTRIS M.A. (1992) - *Dinamica ed evoluzione del litorale campano-laziale: 5-Variazioni della linea di riva dall'epoca romana ad oggi nel tratto compreso tra Foce Volturno e Torre San Limato-Mondragone*. Atti 10° Congresso A.I.O.L. Alassio 4/6 Novembre 1992, 543-554.
- COLELLA A. (1988) - *Pliocene-Holocene fan deltas and braid deltas in the Crati Basin, southern Italy: a consequence of various tectonic conditions*. In: Fan Deltas: Sedimentology and Tectonic Setting. Eds. W Nemeč and R.J. Steel. 50-74.
- DELLA ROCCA B., MAZZANTI R. & PRANZINI E. (1987) - *Studio geomorfologico della Pianura di Pisa*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 10, 56-84.
- DE SIMONE R., FERRETTI O. & MANFREDI FRATTARELLI F.M. (1993) - *Analisi statistica multivariata applicata all'interpretazione dei processi di sedimentazione*. In: Arcipelago Toscano. Ed. S. Furia ENEA. 229-250.
- FERRETTI O., MICHELOZZI E. & SENSI L. (1989) - *Rilevamento mediante Side Scan Sonar e Uniboom sulla piattaforma costiera compresa tra Gaeta e la Foce del Volturno*. In: Indagine sul materiale sospeso nelle acque costiere comprese fra Gaeta e la foce del Volturno. Ed. ENEA, 13 -22.
- FERRETTI O. & SETTI M. (1989) - *Caratterizzazione mineralogica del materiale sospeso nelle acque comprese fra Gaeta e la foce del Volturno*. In: Indagine sul materiale sospeso nelle acque costiere comprese fra Gaeta e la foce del Volturno. Ed. ENEA, 37-60.
- FIRPO M., PICCAZZO M., BONCI M.C., IVALDI R. & POGGI F. (1992) - *Il delta sommerso del Fiume Centa (Albenga): Caratteristiche morfologiche e stratigrafiche*. Atti 10° Congr. A.I.O.L. Alassio 4/6 Novembre 1992, 587-602.
- GALLETTI FANCELLI M.L. (1978) - *Ricerche sulla subsidenza della pianura pisana. Analisi polliniche di sedimenti quaternari della pianura costiera tra Pisa e Livorno*. Boll. Soc. Geol. It., 97, 197-245.
- GALLOWAY W.E. (1975) - *Process framework for describing in the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional system*. In: Deltas, Model for Exploration, Ed. Broussard M.L., Houston Geol. Soc., 87-98.
- GIOLI G. (1894) - *Il sottosuolo delle pianure di Pisa e di Livorno*. Boll. Soc. Geol. It., 12, 210-235.
- INNOCENTI L. & PRANZINI E. (1993) - *Geomorphological evolution and sedimentology of the Ombrone River Delta, Italy*. Journal Coastal Research, 9, 481-493.
- LEONI G. & DAI PRA G. (1997) - *Variazioni del livello del mare nel tardo Olocene (ultimi 2500 anni) lungo la costa del Lazio in base ad indicatori geo-archeologici. Interazioni fra neotettonica eustatismo e clima*. Ed. ENEA RT/AMB/97/8 107pp.
- LUIGGI L. (1914) - *La derivazione dall'Ombrone per la bonifica di Grosseto*. Giornale del Genio Civile, 52, 254-260.
- MARINELLI O. (1926) - *Sull'età dei delta italiani*. La Geografia, 14, 21-29.
- MAZZANTI R. (1983) - *Il punto sul Quaternario della fascia costiera e di dell'arcipelago Toscana*. Boll. Soc. Geol. It., 102, 419-556.
- MIKHAILOV V.N. (1993) - *The influence of rapid and significant sea level changes on hydrological and morphological processes in river deltas*. In: Sea level changes and their consequences for hydrology and water management. A contribution to the UNESCO IHP.V Project H-2-2, Koblenz, p 17-24.
- MIKHAILOVA M.V., BELLOTTI P., VALERI P. & TORTORA P. (1998) - *The Tiber River Delta and Hydrological and Morphological Features of its Formation*. Water Resources, 25 (5), 572-582.
- ORTOLANI F. & PAGLIUCA S. (1993) - *Climatic variations and crises in the anthropized environment in the Mediterranean Region*. Proc. Geosciences & Archaeology Seminar, spec. publ. N. 70, 113-126.
- ORTOLANI F. & PAGLIUCA S. (1997) - *Evidenze geoarcheologiche di cicliche variazioni climatiche e modificazioni dell'ambiente fisico «tipo effetto serra» durante il periodo storico nell'area mediterranea*. Atti del IX Congresso Nazionale dei Geologi Risorse e sviluppo prospettive per il XXI secolo. Roma 17-20/aprile/1997.
- PASQUINUCCI M. & MAZZANTI R. (1985) - *Le fonti «storiche» nello studio delle aree costiere*. In «La gestione delle aree costiere». Roma.
- PAGLIUCA S. (1998) - *Geologia ed Evoluzione Geomorfologica Olocenica della Bassa Pianura del Fiume Volturno*. Atti 79° Congresso Nazionale S.G.I. Palermo 21-23/settembre/1998. B, 645-648.
- PENNETTA M., VALENTE A., ABATE D., BOUILLON G., DE PIPPO T., LEONE M. & TERLIZZI F. (1998) - *Influenza della morfologia costiera sulla circolazione e sedimentazione sulla piattaforma continentale campano-laziale tra Gaeta e Cuma (Italia Meridionale)*. Boll. Soc. Geol. It., 117, 281-295.

- POSTMA G. (1995) - *Causes of architectural variation in deltas*. In: *Geology of Deltas*. Eds. Oti M.N. & Postma G. 3-16.
- PRANZINI E. (1994) - *The erosion of the Ombrone River Delta (Italy)*. Second International Symposium EUROCOAST, Lisbon, 26/29 September 1994, 133-147.
- ROMANO P., SANTO A. & VOLTAGGIO M. (1994) - *L'evoluzione geomorfologica della pianura del Fiume Volturno (Campania) durante il tardo Quaternario (Pleistocene mediosuperiore-Olocene)*. *Il Quaternario*, **7** (1), 41-56.
- SEGRE A.G. (1955) - *Nota sulla idrografia continentale e marina*. In: Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000 F° 111 Livorno. Servizio Geologico d'Italia, 20-25.
- SUGUIO K. & MARTIN L. (1981) - *Significance of Quaternary sea-level fluctuations for delta construction along the Brazilian Coast*. *Geo Marine Letters*, **1**, 181-185.
- TORTORA P. (1989) - *I fondali antistanti la costa di Montalto di Castro (alto Lazio): caratteristiche ed evoluzione tardo-quaternaria*. *Il Quaternario*, **2**, 175-187.
- WRIGHT L.D. (1970) - *The influence of sediment availability on Patterns of beach ridge development in the vicinity of the Shoalhaven River Delta, N.S.W.* *The Australian Geographer*, **11** (3), 336-348.
- WRIGHT L.D. & COLEMAN J.M. (1973) - *Variation in morphology of major river deltas as function of ocean wave and river discharge regimes*. *Bull. A.A.P.G.*, **57**, 370-398.

Manoscritto pervenuto l'8 Marzo 2000; Testo approvato per la stampa il 5 Ottobre 2000; Ultime bozze restituite il 19 Ottobre 2000.