

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

Umberto Simeoni¹, Renzo Dal Cin¹,
Giorgio Fontolan² e Umberto Tessari¹

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

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

Riassunto

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

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

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

Introduzione

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

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

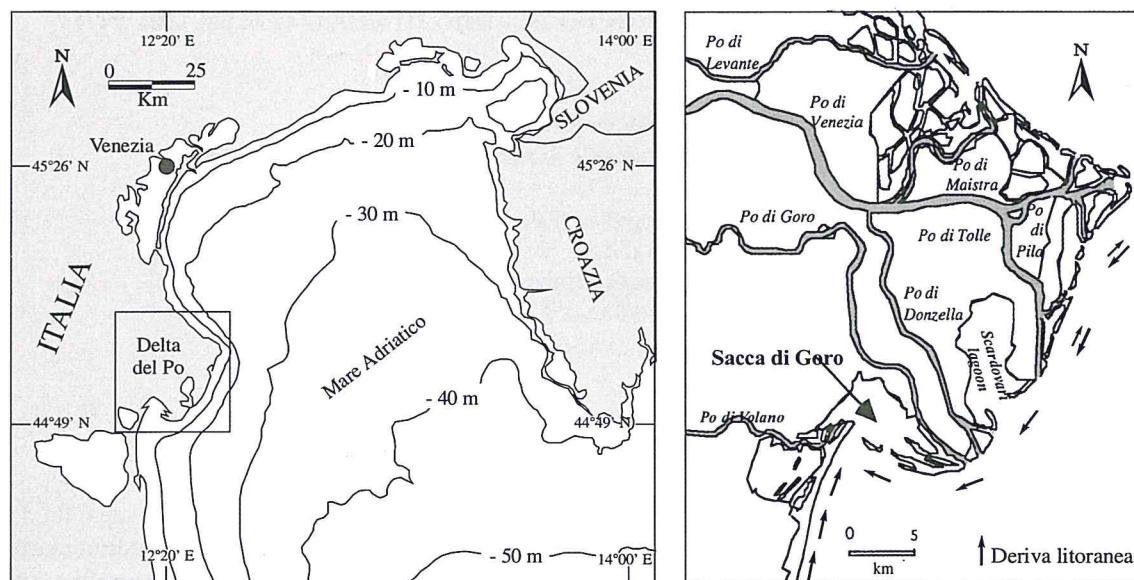


Figura 1 - Ubicazione del delta del Po, dei suoi rami fluviali e della laguna di Goro.

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

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

Evoluzione degli scanni di Goro

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

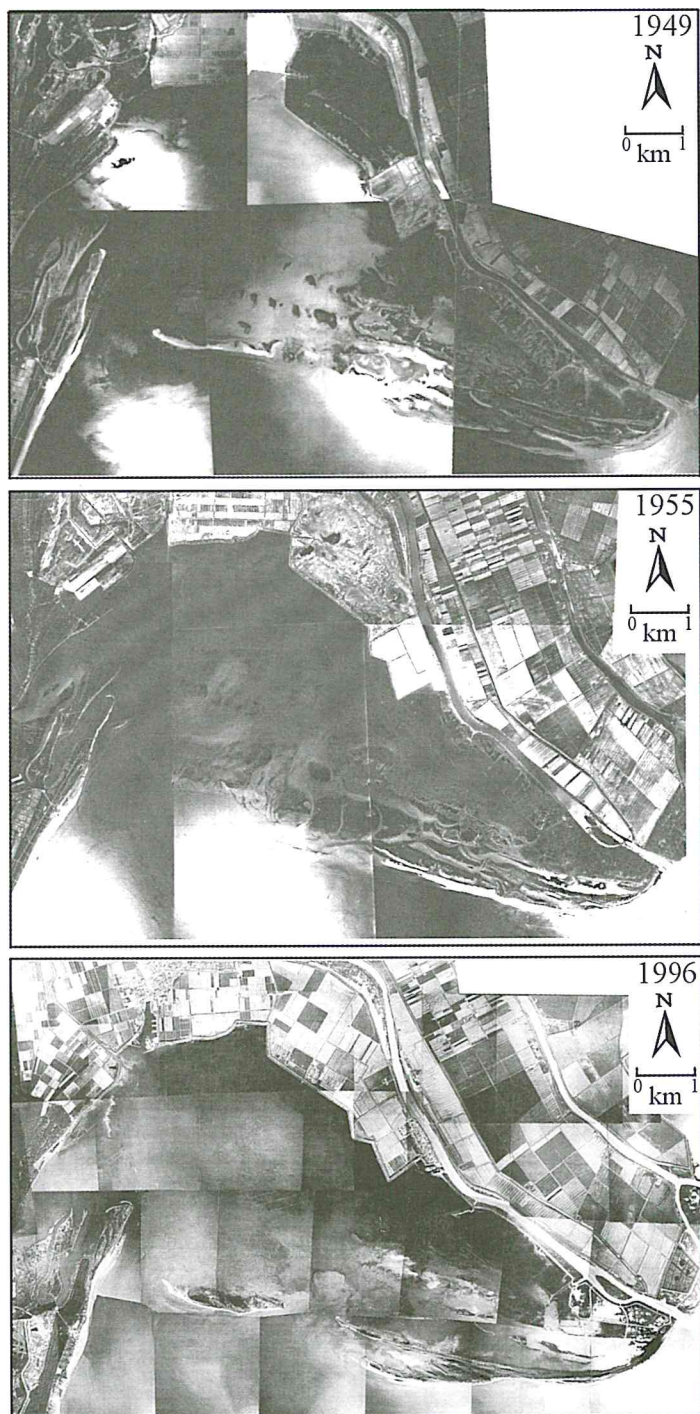


Figura 2 - Fotomosaici della laguna di Goro che mettono in evidenza le modalità di frammentazione e distruzione degli scanni. A causa della deformazione dei fotomosaici la scala è approssimativa.

Evoluzione del territorio

Dall'inizio secolo agli anni '40

Nella prima metà del secolo l'area del delta era caratterizzata da importanti contributi solidi da parte del Po. Il trasporto torbido medio (Fig. 3) tra il 1918 ed il 1944 è stato di circa 12,5 Milioni di t/anno, con minimi deflussi nel biennio 1942-43, senza manifestare, pur con oscillazioni tendenzialmente cicliche (periodi 1918-25, 1926-33 e 1934-44), variazioni significative. La portata media annua tra il 1918 ed il 1949 è stata di 1.390 m³/s e nello stesso periodo sono stati registrati 12 eventi di piena con portate superiori a 6.500 m³/s e con frequenze molto variabili. Secondo alcune stime (Idroser, 1994) sulla base delle variazioni volumetriche del Delta in prossimità della costa, si può ipotizzare che, nel periodo 1900-40, l'area di Goro abbia ricevuto un apporto medio di materiale sabbioso attorno a 4,5-5 Mm³/anno.

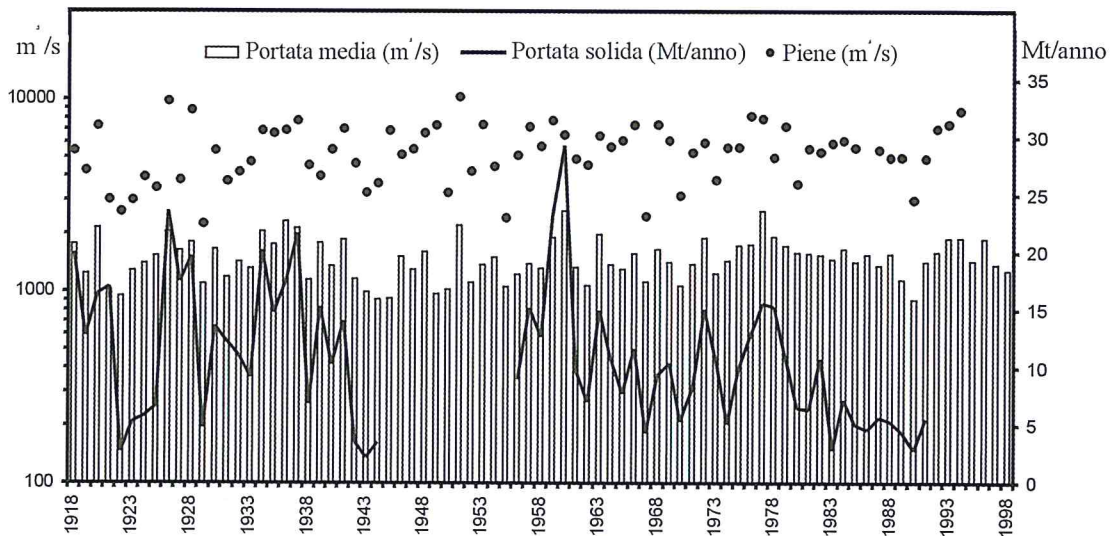


Figura 3 - Distribuzione della portata liquida e torbida e degli eventi di piena avvenuti tra il 1918 ed il 1998. Le serie sono incomplete per la mancanza di registrazioni.

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

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

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

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

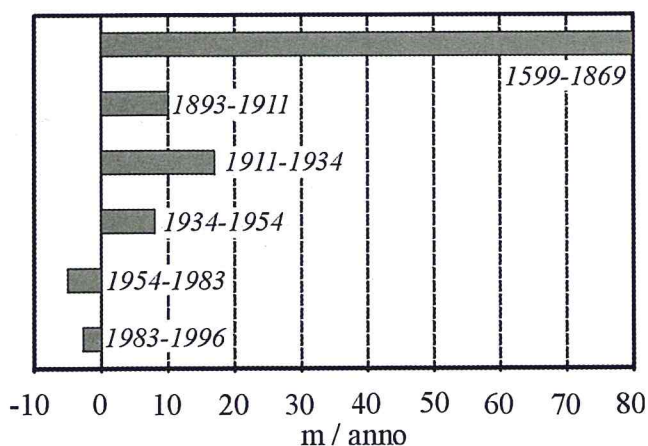


Figura 4 - Diagramma delle variazioni della linea di riva nell'area di foce del Po di Goro. I valori si riferiscono ad un tratto di litorale ubicato a ridosso della sponda destra del fiume e lungo circa 1 km.

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

Dagli anni '40 agli anni '80

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

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

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

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

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

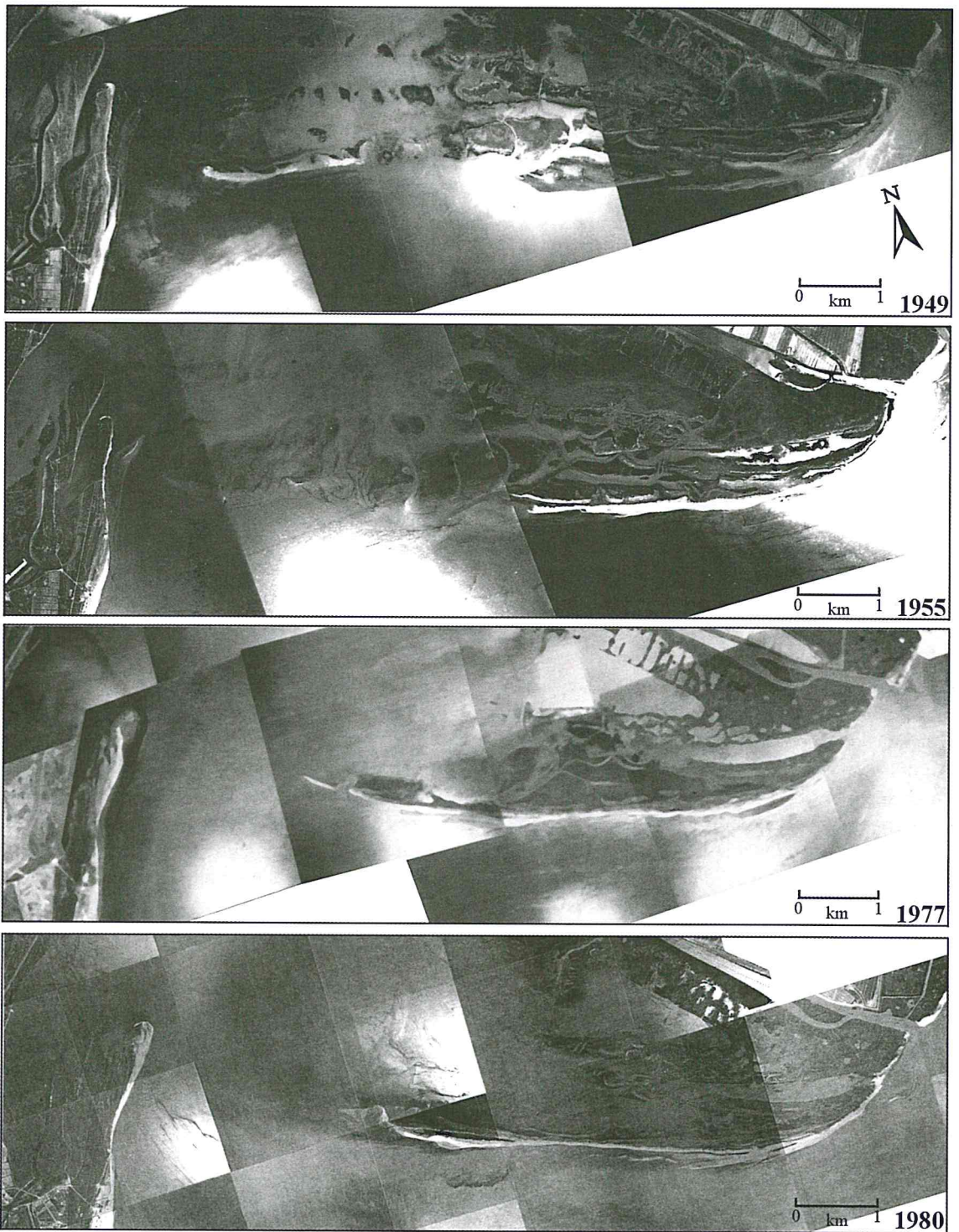


Figura 5 - Fotomosaici dell'area dello Scanno di Goro che ne documentano l'evoluzione fra il 1949 ed il 1980.

Per evidenziare e quantificare le principali variazioni morfologiche avvenute nello Scanno, sono stati posti a confronto i rilievi del 1934 e del 1955 (Fig. 6). Sovrapponendo alle immagini digitalizzate una griglia lunga 12,5 km e suddivisa in 90 sezioni, parallele e distanziate di 100 m, sono state evidenziate e quantificate (McBride e Byrnes, 1997) le diverse tendenze evolutive: avanzamento od arretramento, allungamento od accorciamento, stabilità, rotazione verso mare o verso terra, rottura, comparsa o scomparsa d'aree emerse. Le più evidenti modificazioni intervenute in questo periodo sono costituite dalla scomparsa dell'isola-barriera (con una superficie di circa 0,41 km²), che delimitava ad ovest la laguna, dallo sviluppo, in una posizione più avanzata, di una nuova freccia litorale, più lungo del precedente, e dal protendimento verso mare della foce del Po di Goro. Ciò ha determinato la formazione di un'unica grande bocca lagunare, interrotta da una piccola isola, lunga circa 300 m. Tra i due rilievi vi è stato un incremento della superficie emersa di 0,29 km², prevalentemente dovuto all'allungamento ed all'allargamento dello Scanno (0,61 km²), compensato dallo smantellamento di alcune isole (perdita di 0,32 km²).

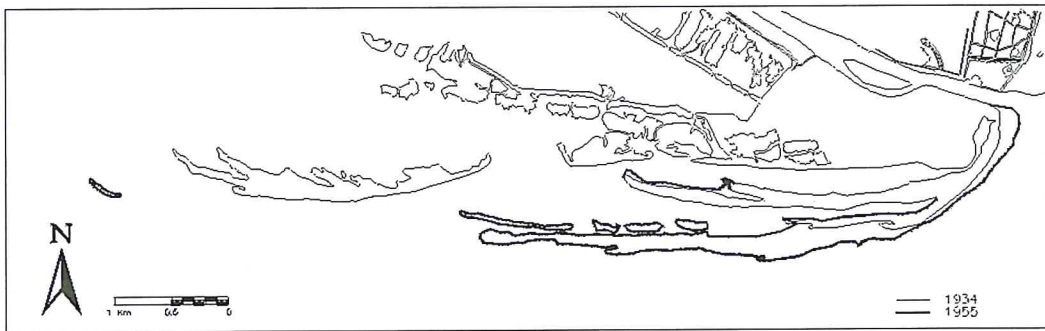


Figura 6 - Confronto tra le linee di riva del 1934 e 1955.

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

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

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

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

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

In questo periodo lo Scanno si è molto sviluppato, continuando a crescere in lunghezza (circa 2,7 km), con conseguente riduzione della larghezza della bocca lagunare, e la superficie emersa risulta notevolmente aumentata (1,07 km²). Per contrastare gli intensi fenomeni erosivi nell'area di foce ed

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

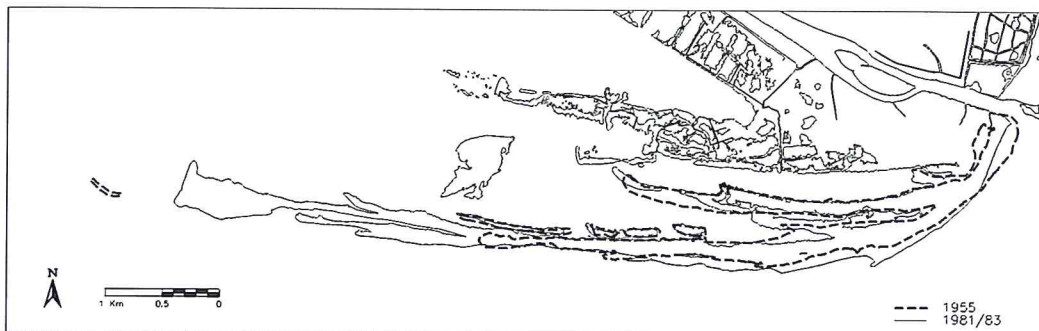


Figura 7 - Confronto tra le linee di riva del 1955 e 1981-83. Il rilievo più recente è stato completato in anni successivi.

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

Dagli anni '80 ad oggi

I dati rilevati tra il 1984 ed il 1997, evidenziano una riduzione della portata liquida del Po (1486 m³/anno) rispetto al periodo precedente, anche se il triennio 1992-94 è stato caratterizzato da significative piene. A questa riduzione è corrisposta una diminuzione del deflusso torbido, che si è attestato sui 5,1 Mt/anno (valore medio periodo 1984-91).

Per l'ultimo ventennio sono disponibili stime (Idroser, 1994) sufficientemente accurate dell'effettivo budget sedimentario dell'area di Goro: nell'area sono giunti nel 1980 0,19 Mm³/anno di sedimenti, 0,21 Mm³/anno nel 1985, 0,24 Mm³/anno nel 1990 ed, infine, 0,25 Mm³/anno nel 1995. E' interessante notare come l'incremento dei volumi di materiale trasportato a mare si attenui progressivamente. Ciò è probabilmente ricollegabile alla progressiva chiusura delle cave in alveo dopo che, tra il 1978 ed il 1982, le escavazioni avevano raggiunto i massimi valori. Alle quantità di materiali portati dai rami del Po vanno aggiunti 0,3 Mm³/anno di sedimenti trasportati dalla corrente lungoriva che risale da meridione e si esaurisce nella laguna.

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

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

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

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

La sovrapposizione dei rilievi del 1981/83 e del 1996 (Fig. 9) mette in evidenza come la sezione della freccia sia diminuita mentre sia continuato il protendimento verso Ovest, con conseguente riduzione della bocca principale. La perdita in superficie emersa, dovuta allo sviluppo della bocca secondaria, è stata di circa 0,03 km². L'isola venutasi a creare, evidenzia un allungamento verso ovest di circa 1 km ed una tendenza alla rotazione, in senso orario, verso l'interno della Sacca. La freccia litorale, in tale periodo, mostra una generale tendenza all'erosione, soprattutto nella parte orientale, ove si assiste ad una perdita in superficie di 0,01 km². Nella parte centrale dello Scanno è invece evidente un forte protendimento verso mare, con la nascita di numerose e pronunciate digitazioni.

Stili evolutivi degli scanni

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

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

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

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

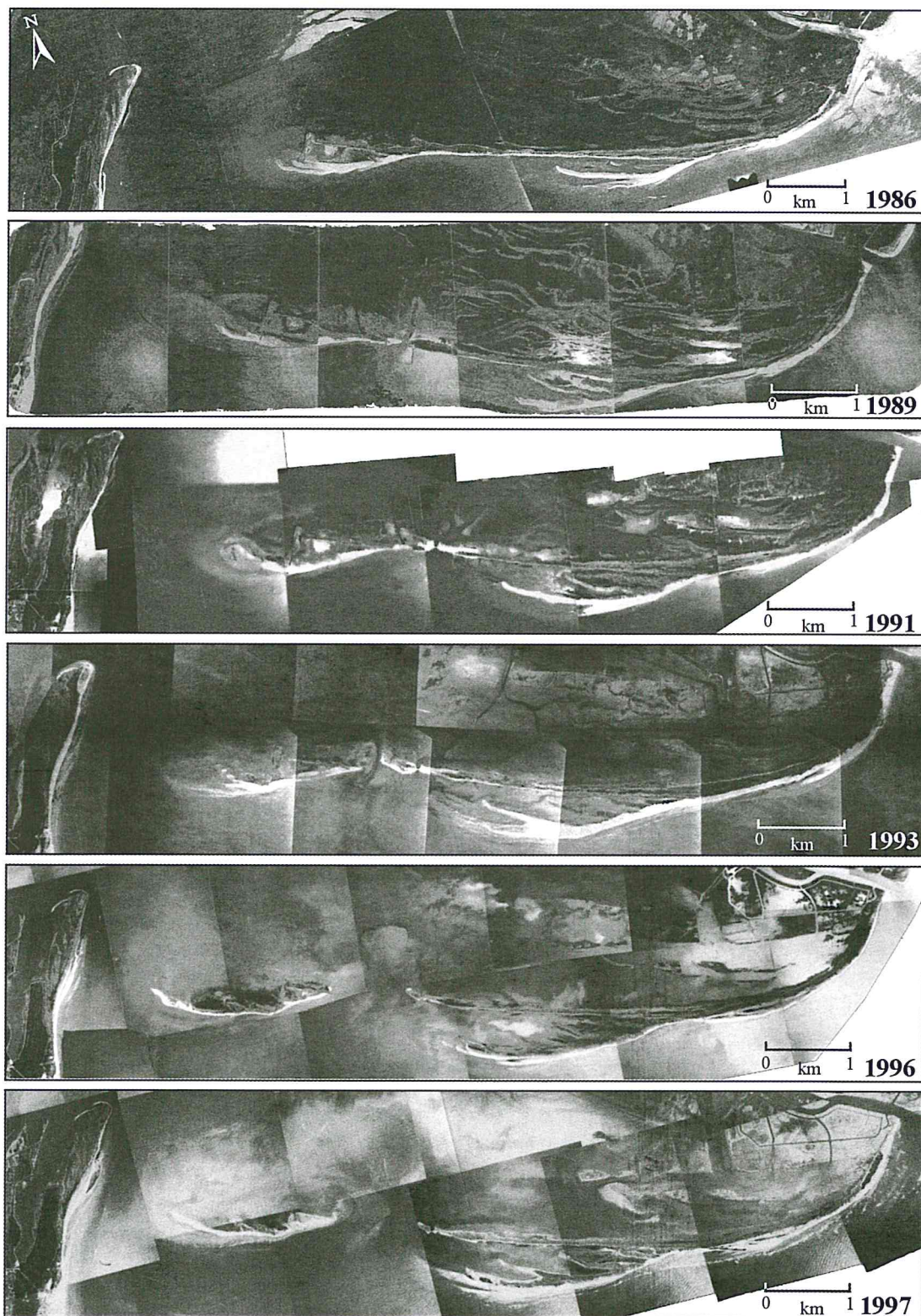


Figura 8 - Fotomosaici dell'area dello Scanno di Goro che ne documentano l'evoluzione fra il 1986 ed il 1997.

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

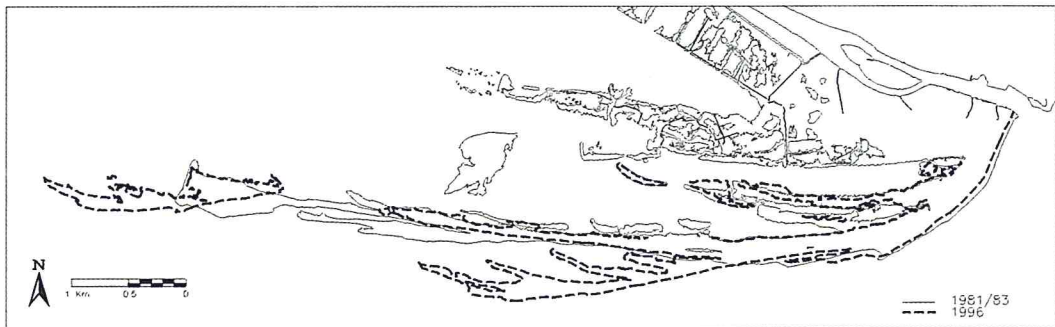


Figura 9 - Confronto tra le linee di riva del 1981-83 e 1996.

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

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

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

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

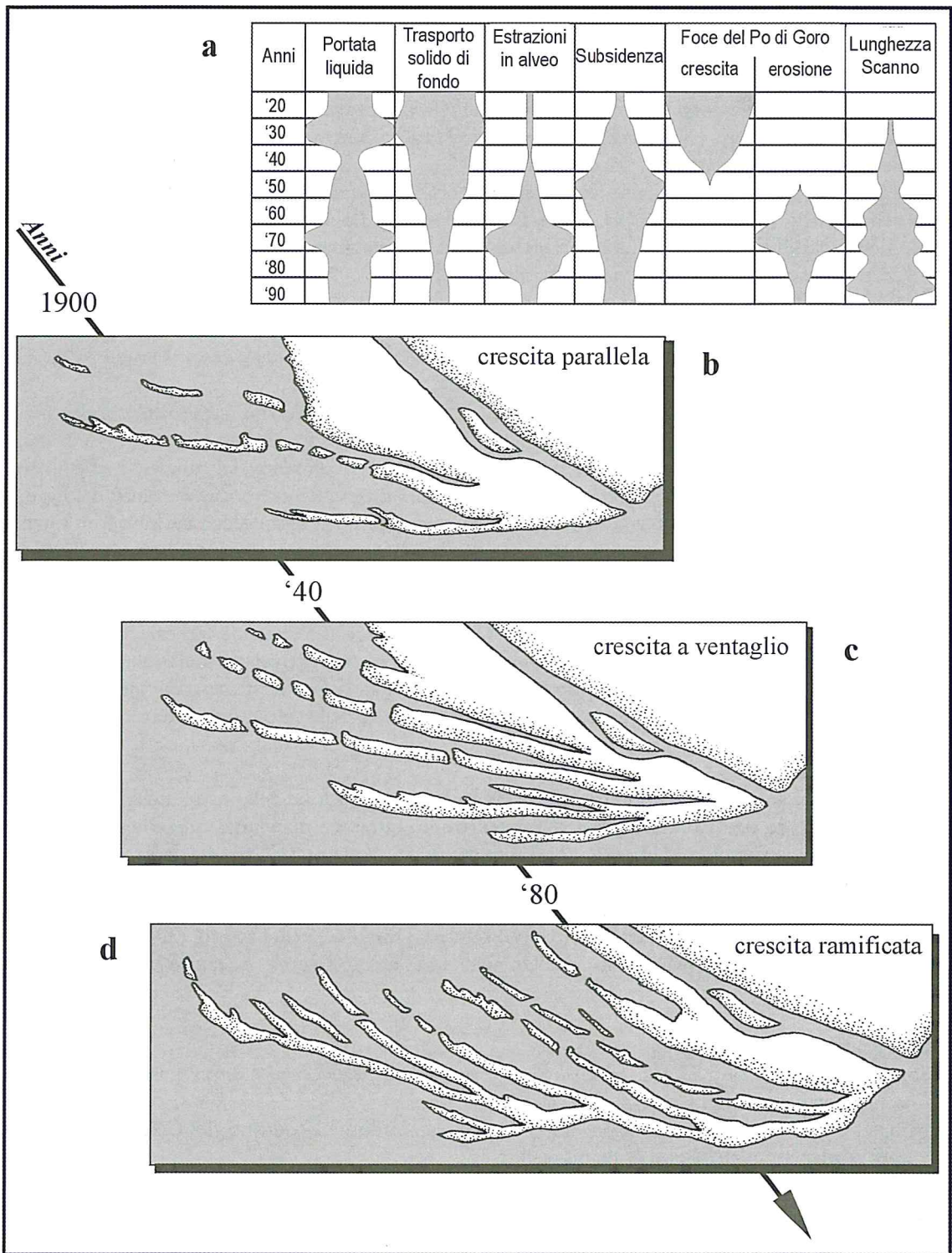


Figura 10 - Schemi semplificati (b, c, d) dei diversi stili di crescita dello spit di Goro. La tabella (a) riporta qualitativamente le variazioni d'alcuni parametri ambientali dell'area del Delta e della laguna di Goro.

Considerazioni

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

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

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

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

Ringraziamenti

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

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

Bibliografia

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

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

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

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