

Caratterizzazione della morfologia di spiaggia lungo lo Scanno di Goro tramite tecniche GPS e rilievi batimetrici

Paolo Ciavola¹, Marco Gatti², Umberto Tessari¹,
Andrea Zamariolo¹ e Carlo Del Grande³

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

²Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara,
Via Saragat 1 - 44100 Ferrara

³Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico Ambientali, Università di Bologna,
Via Zamboni 67 - 40127 Bologna

Riassunto

Allo scopo di evidenziare le caratteristiche morfologiche e dinamiche della spiaggia dello Scanno di Goro è stato svolto un rilievo topografico della linea di riva ed un rilievo topobatimetrico lungo una serie di sezioni, orientate ortogonalmente alla costa. Il posizionamento è stato effettuato mediante ausilio della tecnica GPS cinematica, dimostratasi accurata e rapida. Ciò ha consentito l'identificazione di zone soggette a variazioni morfologiche e l'individuazione di tre principali tipologie di profilo di spiaggia con comportamento morfodinamico da riflettente a dissipativo. In prossimità della foce del Po di Goro le spiagge sono caratterizzate da barra parallela; nella parte intermedia dello Scanno forme come il terrazzo di bassa marea diventano predominanti; sulla parte terminale dello Scanno si osservano forme in emersione sulla battigia, legate al meccanismo evolutivo del sistema.

Introduzione

La freccia litorale che separa la Laguna di Goro dal mare aperto, viene indicata con una terminologia di uso locale molto particolare, "Scanno di Goro", sia nella letteratura geografico-geologica che in quella divulgativa. Nel seguente articolo l'uso del termine Scanno è essenzialmente riferito a questa forma costiera, per quanto in geomorfologia la parola è generalmente considerata come traduzione dell'inglese *nearshore bar*, la barra di spiaggia situata al di sotto del livello delle basse maree (Carobene e Brambati, 1975). Lo Scanno ha iniziato a formarsi tra la fine del 1800 e l'inizio del secolo scorso, inizialmente come un sistema di frecce-isole barriera, che si allungavano per circa 3.5 km dalla foce del Po di Goro e che presentavano una serie di isolette sabbiose alla loro estremità (Dal Cin, 1994). L'attuale freccia litorale ha cominciato a prendere forma dal 1940 in poi, mentre il precedente sistema veniva eroso e sommerso, presentando fasi alterne di accrescimento ed erosione sino a circa il 1977. Da allora sino ai tardi anni '80 lo Scanno soffre una forte erosione in seguito alla diminuzione del carico sedimentario del Po, perdendo circa un chilometro di lunghezza rispetto ai complessivi 7.8 km del 1977 (Dal Cin, 1994). Dalla fine degli anni '80 in poi, la freccia ricomincia a crescere ed a cambiare forma, occludendo gran parte della laguna retrostante, tanto che negli anni '90 interventi di apertura di bocche artificiali vengono effettuati per migliorare lo scambio idrico con il mare aperto, producendo forti disequilibri nella dinamica evolutiva della freccia litorale (Simeoni et al. 1998a; 1998b).

Scopo del lavoro

Dati sull'andamento della linea di riva utilizzando metodi aereofotogrammetrici tradizionali vengono raccolti in maniera sistematica da organizzazioni governative in vari paesi del mondo, ad es. le agenzie federali negli Stati Uniti (Gorman et al., 1998) o il Ministero dei Lavori Pubblici nei Paesi Bassi (Rijkswaterstaat, 1990). In Italia alcune autorità regionali utilizzano tale metodo per studi di gestione costiera (Idroser, 1996). Come puntualizzato da Gorman et al. (1998), tale metodo permette di coprire aree molto vaste in poco tempo, tranne che condizioni di scarsa visibilità dovute a presenza di nebbia o nubi rappresentino un problema. Inoltre, il rilievo fotogrammetrico deve essere affiancato da rilevamenti batimetrici sulla parte sommersa della spiaggia, per quanto il recente sviluppo della costosa tecnica LIDAR (LI Detection And Ranging) permetta di effettuare anche il rilievo batimetrico tramite sensore in volo, con precisione verticale nell'ordine dei 15 cm (Irish e Lillycrop, 1999). Sono stati eseguiti profili topobatimetrici e rilievi della linea di costa con tecnica GPS allo scopo di evidenziare le caratteristiche morfologiche della spiaggia emersa e sommersa lungo lo Scanno di Goro e di ottenere una linea di riva aggiornata. Nel lavoro verrà evidenziata la metodologia di misura applicata e verranno messi in evidenza i vantaggi di tale tecnica. In Figura 1 è riportata l'ubicazione dei profili eseguiti lungo lo Scanno ed i vertici della rete GPS di inquadramento utilizzata durante l'indagine.

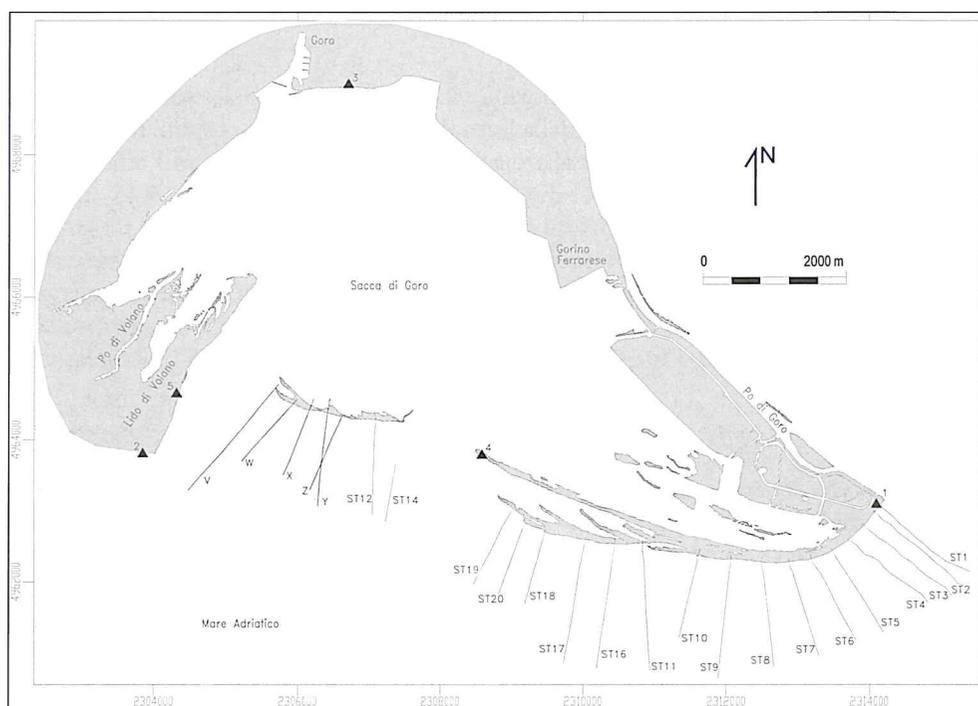


Figura 1 - Carta con profili e vertici GPS della rete di inquadramento (coordinate Gauss Boaga – fuso est).

Metodologia di rilievo della linea di riva

Definizione di “Linea di Riva”

Oggetto del rilevamento è la “Linea di Riva”, intesa come linea di contatto tra il mare e la terraferma (*shoreline*), ovvero quella linea che si ottiene dall'intersezione delle superfici che rappresentano il livello medio del mare ed il terreno (Fig. 2). La linea di riva così definita è, per sua natura, di difficile localizzazione sul terreno: l'effetto delle maree e la presenza di eventi meteomarini localmente sfavorevoli, possono produrre su di essa forti variazioni geometriche in limitati intervalli di tempo. Per questo motivo tale linea, verrà da noi indicata con il nome di “Linea di Riva Vera o Teorica”.

Sul terreno può essere localizzata anche una linea di riva convenzionale, indicata con il nome di “Linea di Riva Istantanea”. Essa rappresenta la linea di intersezione del terreno con la superficie del mare al momento (istante) della misura (Fig. 2).

La “Linea di Riva Teorica” e quella istantanea si trovano all’interno di una striscia di terra di ampiezza variabile, delimitata dal livello di alta e di bassa marea. Tale striscia di terra si indica con il nome di “Fascia Intertidale” (Fig. 2).

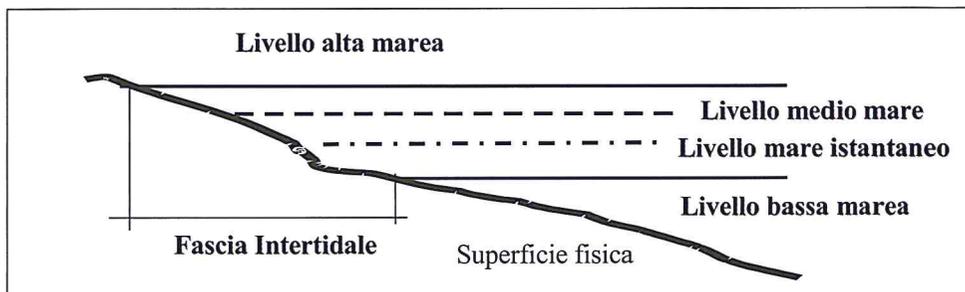


Figura 2 - Definizioni di linea di riva.

Tecnica di Misura

La posizione planimetrica della linea di “Riva Teorica” può essere determinata, con attendibilità, attraverso un rilevamento diretto, eseguito con tecniche e strumentazioni topografiche classiche. Tale metodo può dare risultati di notevole precisione, ma si presenta lento e costoso, soprattutto quando i tratti di costa da rilevare sono di notevole lunghezza (Gorman et al., 1998).

Nello studio qui presentato si è rinunciato a questo tipo di rilevamento, optando per un rilevamento GPS in modalità “Cinematica”, nelle due varianti “Continua” e “Stop and Go”. Tale tecnica comincia a trovare applicazione sempre maggiore nel campo del rilevamento di spiaggia, in virtù della grande precisione e rapidità di misura (Dail et al., 2000).

Tecnica GPS cinematica “continua”

In tale tecnica si posiziona, per tutta la durata del rilievo, un ricevitore GPS (ricevitore Master) su di un vertice di coordinate note (Fig. 3): con un secondo ricevitore GPS (ricevitore Rover) si percorre la spiaggia, seguendo il limite di battigia (Fig. 3). Attraverso la misura della fase del segnale trasmesso dal satellite, è possibile, per ogni intervallo di campionamento, calcolare le coordinate tridimensionali del ricevitore in movimento, ovvero le coordinate dei punti di battigia. Il rilievo deve essere fatto in periodi di mare calmo, quando cioè le condizioni meteorologiche non influenzano troppo il livello del mare ed è presente il solo effetto della “marea astronomica”. In generale è questa la situazione operativa migliore nella quale si elimina, in un determinato paraggio la cosiddetta “marea meteorologica”. Quest’ultima è prodotta da forti venti o brusche differenze di pressione atmosferica ed è responsabile delle variazioni anomale di livello marino in bracci di mare chiusi o poco profondi.

E’ consigliabile, inoltre, rilevare più volte il tratto di costa, per esempio una volta in andata ed una volta in ritorno. La tecnica presenta una grande produttività: un rilevatore che si muove sulla spiaggia a passo d’uomo può misurare anche dieci chilometri di costa al giorno. Da sottolineare anche la sua precisione: le coordinate tridimensionali del limite di battigia sono caratterizzate da errori quadratici medi non superiori ai dieci centimetri (Gatti et al., 1995). Con questa tecnica si rileva la posizione della “Linea di Riva Istantanea”, ovvero la posizione della linea di riva all’istante della misura.

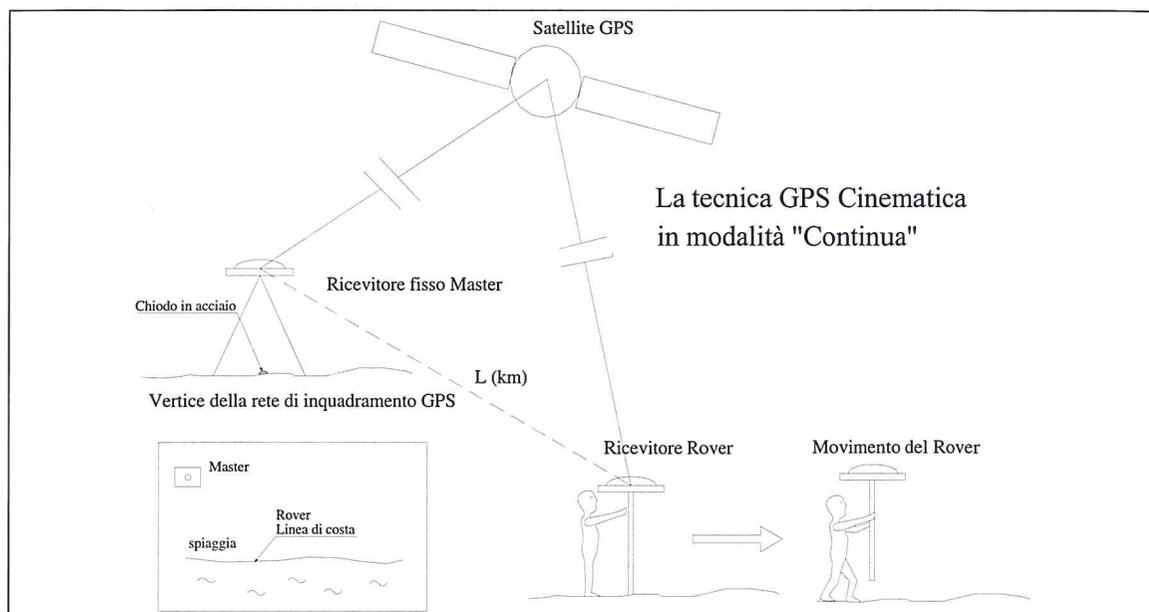


Figura 3 - La tecnica GPS Cinematica "Continua": schema della misura.

Tecnica GPS cinematica "Stop and Go"

Il rilievo della linea di costa può essere eseguito rilevando in modalità cinematica "Stop and Go" delle sezioni trasversali alla linea di riva (Fig. 4). A rilievo eseguito si individua, su ciascuna di esse, il punto di quota zero, con riferimento al livello medio del mare locale. Congiungendo i punti di quota zero appartenenti ad ognuna delle sezioni rilevate, si ottiene una spezzata che rappresenta l'andamento planimetrico della linea di costa. La tecnica è molto simile a quella topografica tradizionale, ma presenta tutti i vantaggi derivanti dall'uso della metodologia e della strumentazione GPS.

Le fasi del rilevamento di una generica sezione sono le seguenti:

- Registrazione, per tutto il tempo del rilievo, della misura di fase del satellite, da parte di un ricevitore GPS (ricevitore Master) posto su di un vertice di coordinate cartografiche E, N e di quota ortometrica H note (Fig. 4);
- Registrazione, per qualche istante, della misura di fase del satellite, da parte di un secondo ricevitore GPS (ricevitore Rover) posto sui punti caratteristici di una sezione e calcolo delle loro coordinate E, N, H rispetto al ricevitore Master (Fig. 4).

A sezione misurata si individuano su di essa le posizioni in quota delle linee di alta e di bassa marea. Tali posizioni si deducono calcolando le escursioni di marea fornite dalle tavole previsionali di marea del giorno e dell'ora in cui si esegue la misura. Sulla stessa tavola di marea si può anche calcolare l'escursione tra la posizione del livello medio del mare del giorno di misura e la posizione del livello del mare istantaneo. Tale escursione consente di individuare sul profilo il punto di quota 0.00 e la retta che rappresenta la linea di costa vera o teorica del giorno della misura.

Si riportano in planimetria i punti di quota 0.00 di ognuna delle sezioni rilevate e si congiungono, ottenendo una spezzata che rappresenta la posizione planimetrica della linea di costa vera o teorica. Lungo il profilo è consigliabile rilevare, oltre al livello mare istantaneo, anche la posizione di eventuali caratteri morfologici presenti (limite di alta marea, berme, variazioni di pendenza, barre) spingendo l'indagine anche ad una porzione significativa della spiaggia sommersa.

Tale tecnica è più lenta e laboriosa di quella continua, in quanto necessita della sosta dell'operatore sui punti della sezione per circa 3 minuti. Tuttavia, risulta essere, più precisa: le coordinate dei pun-

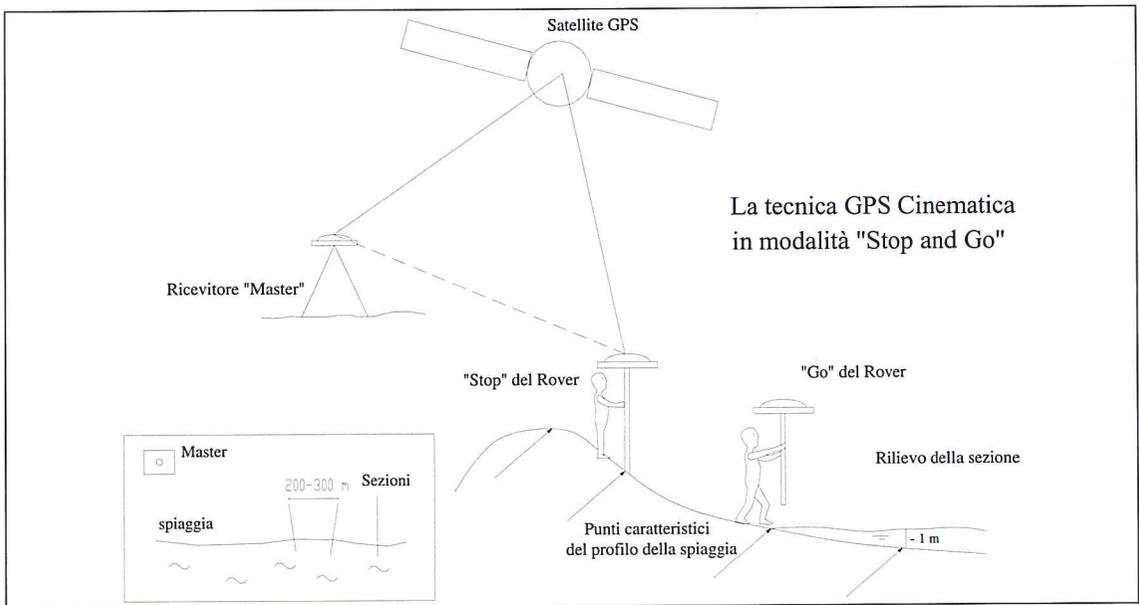


Figura 4 - La tecnica GPS Cinematica "Stop and Go": schema della misura.

ti del profilo hanno errori quadratici medi inferiori ai cinque centimetri. Inoltre con essa si rileva la posizione della linea di riva vera o teorica.

Rete di Inquadramento, Geoide Locale e Tavole di Marea

L'utilizzo della tecnica GPS in modalità cinematica ha richiesto l'istituzione ed il rilevamento di una rete di inquadramento, la conoscenza delle ondulazione ellissoidiche e delle previsioni della marea.

La rete di inquadramento istituita nella Sacca di Goro, è costituita da tre vertici principali e due vertici secondari (Fig. 1).

Nelle operazioni di calcolo si è eseguita una compensazione a minimi vincoli, assumendo come fisse le coordinate del vertice 1: queste ultime furono dedotte precedentemente per collegamento alla rete internazionale IGS (Gatti, 1996). La rete è stata poi rototraslata nel sistema cartografico nazionale di Gauss-Boaga, utilizzando i parametri di rototraslazione forniti dall'Istituto Geografico Militare Italiano. Ognuno dei vertici fu infine collegato altimetricamente ai caposaldi della rete di livellazione dell'Idroser (1996). Durante la campagna di misura "cinematica", su tali vertici sono stati posizionati i ricevitori GPS "Master".

Per trasformare la differenza di quota ellissoidica, misurabile con il GPS, in differenza di quota ortometrica, necessaria per l'inquadramento altimetrico delle sezioni trasversali, si è reso necessario stimare un modello di geoide "locale". Data la limitata estensione della zona, è stato ipotizzato un modello di geoide "piano". I valori dei residui della compensazione sono risultati di pochi centimetri, confermando la validità dell'ipotesi assunta.

Come è ben noto, il livello medio mare in un punto si ottiene mediando le osservazioni ottenute con un mareografo, in un lungo periodo di tempo. Poiché nella zona di rilievo non era in funzione nessun mareografo, per valutare l'escursione giornaliera del livello del mare e le relative alte e basse maree nelle giornate di misura, si è deciso di usare i dati di marea previsionale forniti da un programma di calcolo (Hydrographic Office, 1991). Il programma esegue il calcolo delle previsioni di marea astronomica, applicando gli algoritmi dell'analisi armonica; tali previsioni sono state confrontate con quelle misurate al mareografo di Porto Corsini (Ravenna) nei giorni del rilevamento, che dista una cinquantina di chilometri dalla zona di sperimentazione. Le previsioni confrontate risulta-

no molto simili, permettendo quindi di escludere l'influenza di agenti locali come il vento od il moto ondoso nel causare condizioni anomale di "acqua alta" (*storm surge*).

Risultati della campagna di misure della linea di riva

La campagna di misure, svoltasi tra la primavera e l'estate del 1998, ha interessato il tratto di spiaggia antistante il Lido di Volano e lo Scanno di Goro. I tratti di costa sono stati rilevati con la tecnica GPS in modalità cinematica "Continua", sia in andata che in ritorno, per un totale di circa 30 km di costa "istantanea". L'intervallo di campionamento è stato settato ad 1 secondo con rilievo di un punto ogni tre metri di costa circa. Il rilievo di tutti i tratti di costa è stato integrato da sezioni trasversali, ad interasse di circa 500 metri, rilevate con la tecnica GPS "Stop and Go". In ogni sezione sono stati misurate le posizioni di 8-10 punti; di questi alcuni si trovavano sulla spiaggia emersa, uno sulla battigia (livello del mare istantaneo) ed altri in acqua (profondità di 0.5 ed 1 m). Il tempo di stazionamento (tempo di stop) per ogni punto di sezione è stato di 50-60 secondi. In Figura 5 è evidenziato un esempio del confronto tra la tecnica GPS cinematica "continua" e "Stop and Go".

Le coordinate geografiche dei punti rilevati sono state trasformate dal sistema di riferimento WGS84 al sistema cartografico nazionale. In seguito tali coordinate sono state riportate sui fogli della Carta Tecnica Regionale (C.T.R.) alla scala nominale 1:5000, ottenendo la rappresentazione cartografica della linea di costa misurata.

La planimetria rilevata sullo Scanno è stata anche sovrapposta alle carte ricavate da alcuni voli fotogrammetrici eseguiti sulla Sacca in tempi recenti: in particolare si è sovrapposto la planimetria alle linee di riva derivate dai voli effettuati negli anni 1978, 1983, 1991 e 1994. Queste ultime sono state ricavate dai dati della Idroser (1996). Dalla sovrapposizione si nota una forte evoluzione dello Scanno con alcune zone di accrescimento e altre di erosione in direzione Nord - Sud e anche la presenza di numerose frecce litorali di minore entità rispetto allo Scanno che emergono e scompaiono in funzione del livello del mare.

Nella parte più a Est si notano arretramenti anche di 150 - 200 metri rispetto al 1983 e 1991 e avanzamenti di circa 100 metri rispetto al 1978.

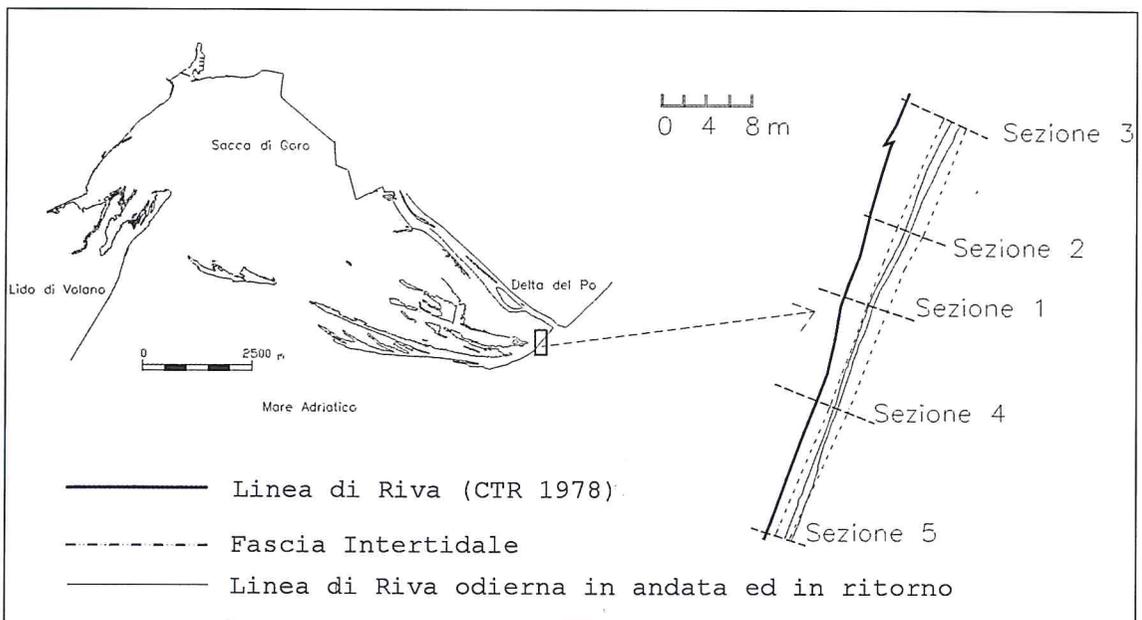


Figura 5- Confronto tra la tecnica GPS cinematica "continua" e "Stop and Go".

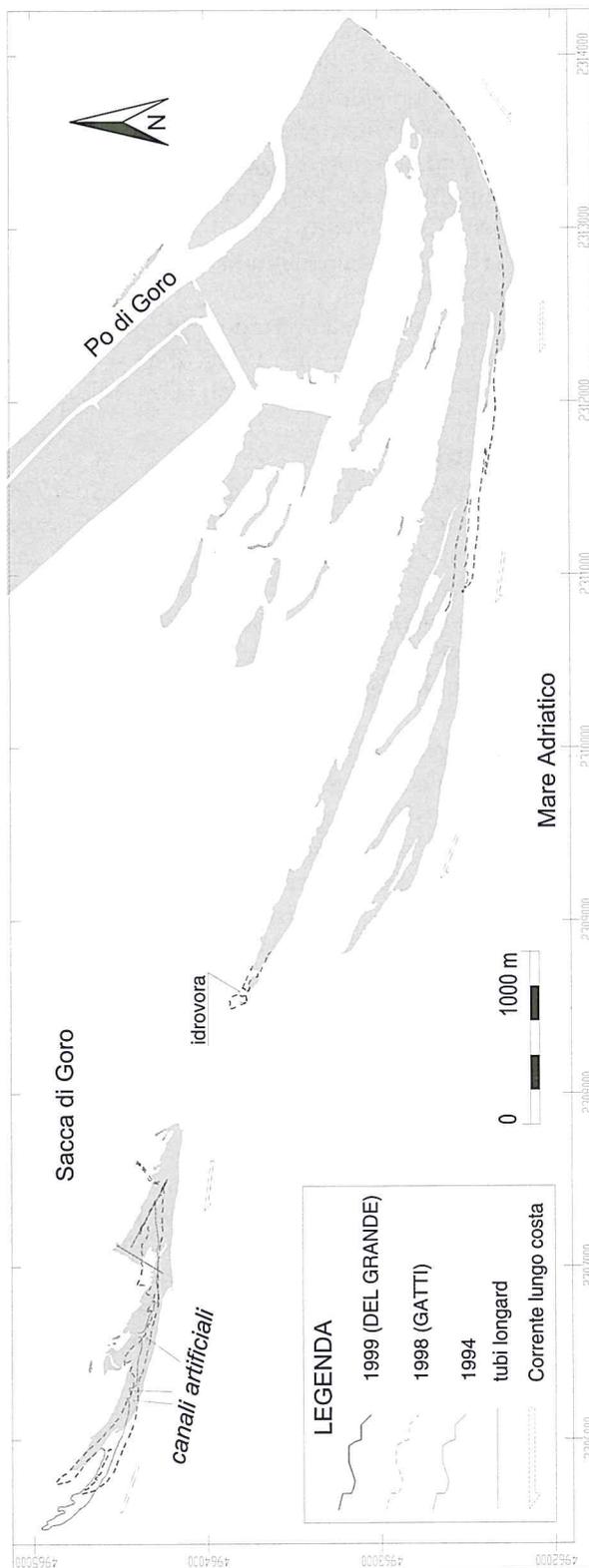


Figura 6 - Rilievo aggiornato al 1999 dello Scanno di Goro ottenuto con tecnica GPS cinematica

Spostandosi verso Ovest la linea di costa rilevata con il GPS è di poco differente dagli anni precedenti, e muovendosi ancora più a Ovest, la presenza di frecce litorali di minori dimensioni rende difficile un vero e proprio confronto fra i diversi anni.

Nelle immediate adiacenze dell'impianto idrovoro posto sullo Scanno il rilievo in cinematico è stato attuato seguendo sia il perimetro individuato dai manufatti dell'idrovora sia il contorno delle lingue di sabbia; per queste ultime il rilievo è stato eseguito seguendo il livello istantaneo del mare.

Dalla planimetria risultante si può ben notare come la morfologia sia completamente cambiata, tanto che l'attuale isola non era presente nel 1978; rispetto al 1991 la stessa planimetria ha una forma molto più allungata in direzione Est – Ovest.

La bocca lagunare che si è creata fra i due scanni ha completamente fatto scomparire alcune lingue di sabbia presenti fino a circa il 1991.

Per quanto riguarda l'isola occidentale dello Scanno, la linea di costa rilevata con il GPS è profondamente variata rispetto a quella riportata sulla C.T.R. (Fig. 6, pag. prec.), a testimonianza di come gli interventi eseguiti dopo il 1978 abbiano modificato la morfologia dello Scanno.

Rilievo di profili topobatimetrici

Allo scopo di evidenziare la morfologia di spiaggia nel Maggio 1998 sono stati eseguiti lungo lo Scanno di Goro e sull'isola occidentale 23 profili topobatimetrici estesi dalla batimetrica –6 m alla cresta della duna (ove presente) o al limite della spiaggia emersa (vedi Fig. 1 per localizzazione). Il rilievo batimetrico vero e proprio è stato effettuato utilizzando un Ecoscandaglio FURUNO a registrazione cartacea, mentre il posizionamento planimetrico dei fix batimetrici e planoaltimetrico della spiaggia emersa è stato effettuato mediante utilizzo di una stazione totale Zeiss Elta 3 o, in alternativa, mediante il GPS cinematico. In Figura 7 vengono riportati alcuni profili significativi.

Campionamento sedimentologico

Per ogni profilo topobatimetrico sono stati raccolti campioni in corrispondenza dei principali elementi morfologici (duna, berma, battigia, gradino di battigia, *swash bar*, truogolo, cresta barra, base barra) e successivamente ogni metro di profondità sino a 6 metri, utilizzando una piccola benna. In laboratorio i campioni sono stati analizzati usando la bilancia di sedimentazione per la frazione sabbiose ed il sedigrafo Sedigraph 5000D per la frazione fangosa, ove presente. I sedimenti sono stati caratterizzati usando i parametri grafici (Folk, 1974) e la classificazione di Wentworth. Una volta ottenuto il Diametro Medio (M_z) del campione è stata calcolata una velocità di sedimentazione "media", utilizzando la formulazione di Hallermeir (1981) per sabbie fini e molto fini, dato che i campioni ricadevano tutti in tali categorie. In Figura 8 vengono presentati gli andamenti del Diametro Medio e Deviazione Standard grafici (in unità phi) sulla stessa scala orizzontale dei profili (Fig. 7).

Indici morfodinamici

Nonostante sia necessaria la ripetizione dei profili per un periodo significativo di almeno 12 mesi allo scopo di caratterizzare lo stato morfodinamico di una spiaggia e di valutarne l'importanza delle variazioni stagionali, si è deciso di procedere a caratterizzare le spiagge dello Scanno di Goro da un punto di vista morfodinamico, usando le più recenti classificazioni presenti nella letteratura internazionale (Wright e Short, 1984; Masselink e Short, 1983; Masselink e Hegge, 1985). Si sono inoltre confrontati alcuni dei profili effettuati con i rilevamenti svolti dalla Idroser (1996) nel periodo dal novembre 1993 al febbraio 1994. Va fatto notare il fatto che tali rilevamenti siano stati effettuati in inverno, mentre quelli oggetto di questo articolo sono stati svolti nella tarda primavera. Ciò comporta alcune limitazioni interpretative nel confronto tra i rilievi, per quanto il clima meteomarinico della zona indichi che a livello energetico il passaggio a condizioni estive avviene in genere da giugno in poi. Inoltre i capisaldi usati dalla Idroser non sono stati ritrovati sul campo, per cui il posizionamento dei profili è basato sulle carte contenute nella relazione del 1996.

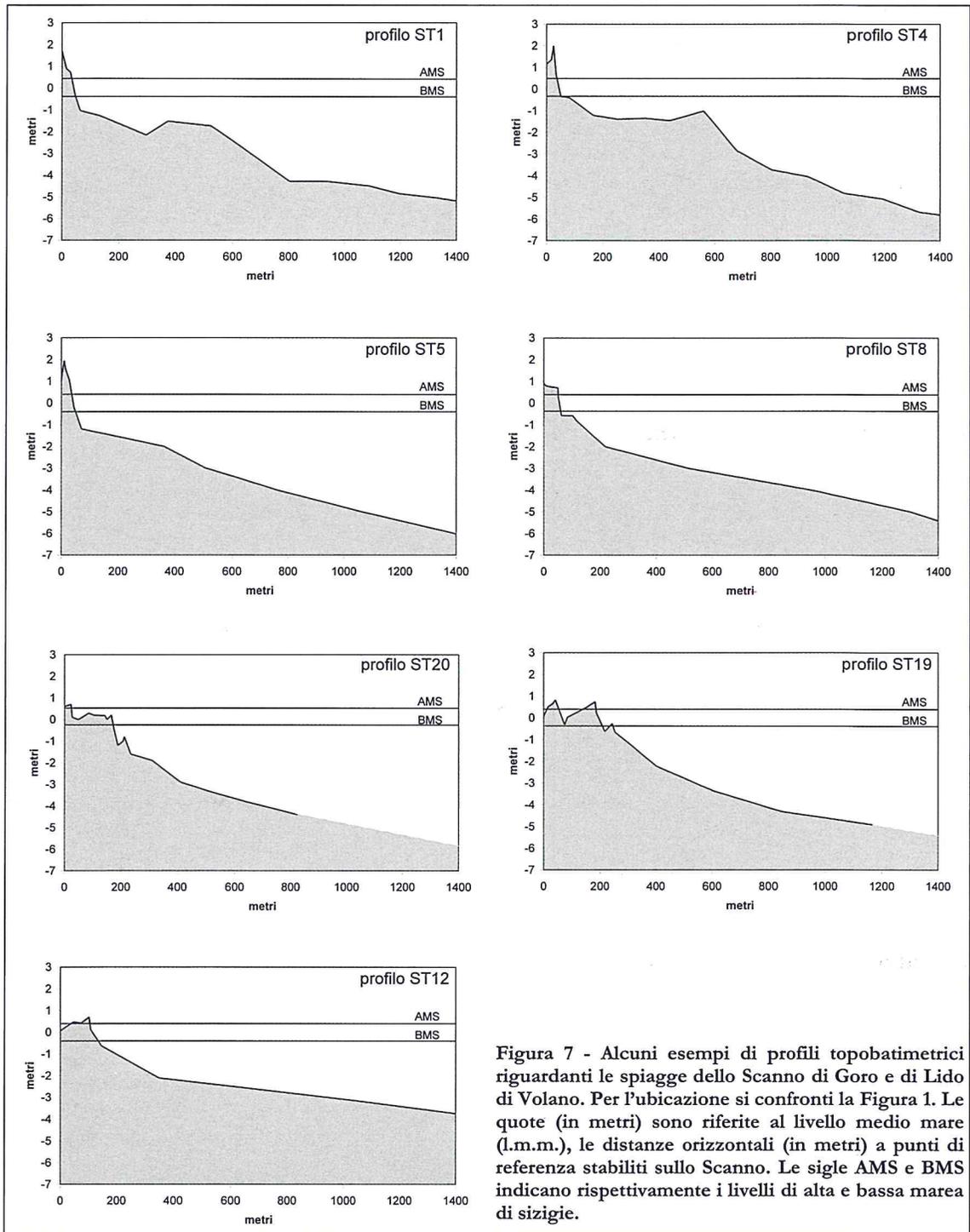


Figura 7 - Alcuni esempi di profili topobatimetrici riguardanti le spiagge dello Scanno di Goro e di Lido di Volano. Per l'ubicazione si confronti la Figura 1. Le quote (in metri) sono riferite al livello medio mare (l.m.m.), le distanze orizzontali (in metri) a punti di riferimento stabiliti sullo Scanno. Le sigle AMS e BMS indicano rispettivamente i livelli di alta e bassa marea di sizigie.

Per poter calcolare gli indici morfodinamici è necessario ottenere per ogni profilo considerato dei valori rappresentativi della pendenza ($\tan\beta$) e della dimensione media. Seguendo le raccomandazioni del CERC (Gorman et al., 1998), si sono calcolati tali parametri per la battigia (*beach slope*), avente come limiti il piede della duna ed il livello medio mare.

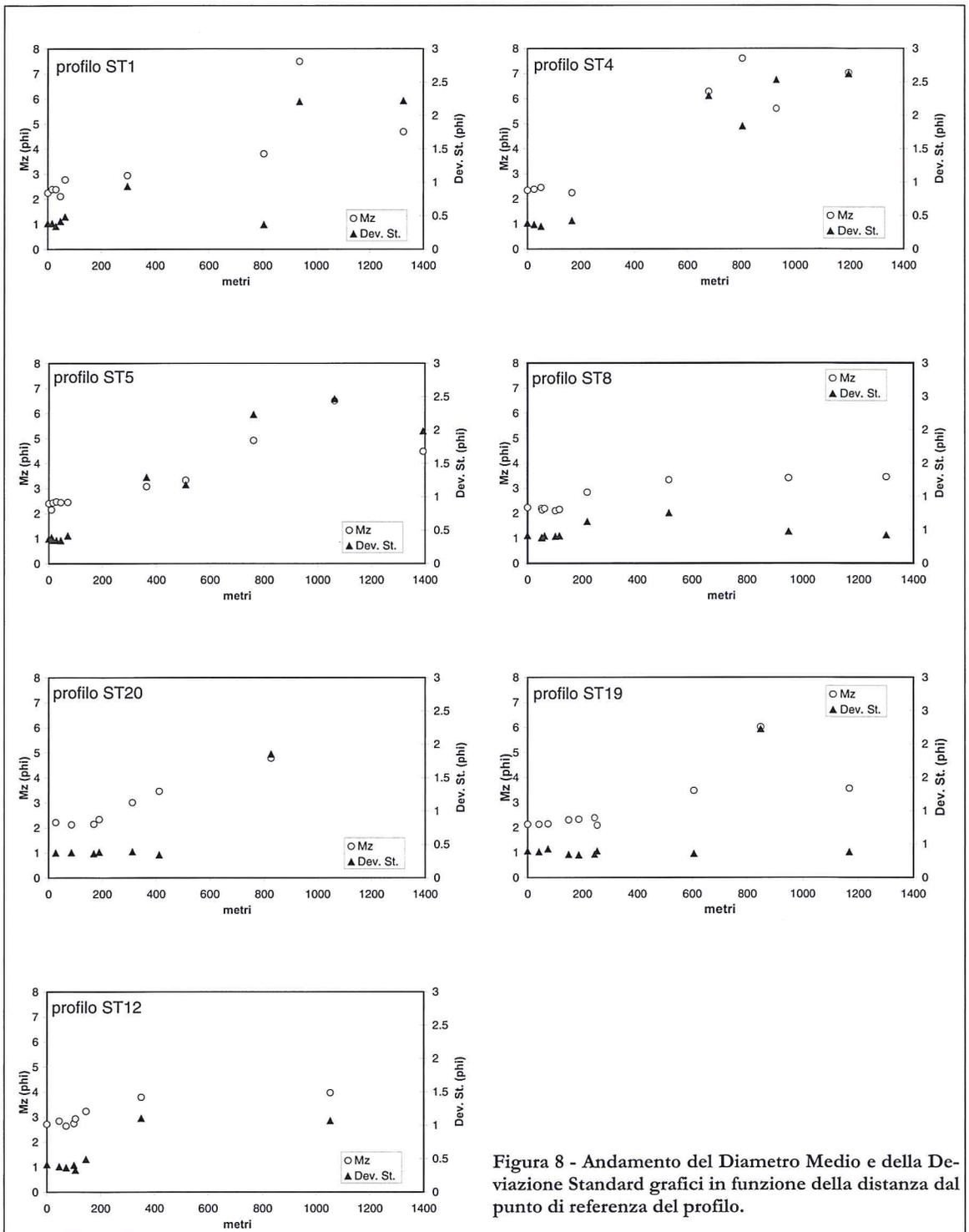


Figura 8 - Andamento del Diametro Medio e della Deviazione Standard grafici in funzione della distanza dal punto di riferimento del profilo.

In maniera analoga si è proceduto per la spiaggia sommersa (*nearshore slope*), delimitata dal livello medio mare e dalla rottura di pendenza esterna alla barra. Per ognuno di questi due segmenti si sono quindi calcolati un diametro medio rappresentativo ottenuto tramite media aritmetica dei valori di media grafica ed una conseguente velocità di sedimentazione.

E' stata, inoltre, calcolata la componente energetica legata al moto ondoso, sotto forma di altezza modale alla frangenza e periodo. A tale scopo, dato che caratterizzazioni del moto ondoso in prossimità della Sacca (Idroser, 1996; Med Ingegneria, 1998) indicano che l'onda significativa (alla piattaforma PCB) più frequente nel paraggio ha provenienza tra i 90 ed 135 °N, con altezza di 0.5 m e periodo sui 3 sec, si è, quindi, deciso di considerare come valore modale di moto ondoso in condizioni di mare profondo una direzione di 120 °N con i valori di altezza d'onda e periodo indicati sopra. Tale onda è stata trasportata alla frangenza per ognuno dei profili batimetrici individuati in Figura 7 tramite codice di calcolo scritto dall'autore principale (Ciavola, 1991; 1997), utilizzando la teoria d'onda lineare per il calcolo delle trasformazioni dovute ai fenomeni di rifrazione e shoaling su fondo, imponendo come condizione di frangenza un rapporto altezza/profondità di 0.78. Per poter utilizzare la classificazione morfodinamica di Wright e Short (1984) sono stati calcolati i seguenti indici:

a) Parametro di scala del *surf* di Guza e Inman (1975):

$$\varepsilon = (a\omega^2)/g \tan^2\beta \quad [1]$$

dove $\tan\beta$ è la pendenza della battigia, g è l'accelerazione di gravità, a è l'ampiezza dell'onda ($H/2$) e ω ($2/\pi T$) è la frequenza angolare dell'onda.

b) Velocità di sedimentazione adimensionale di Dean (1973):

$$\Omega = (H_b)/w_s T \quad [2]$$

dove H_b è l'altezza d'onda alla frangenza, w_s è la velocità di sedimentazione del diametro medio del sedimento di spiaggia e T il periodo d'onda.

Tabella 1 - Parametri utilizzati nel calcolo degli indici morfodinamici. La sigla BS indica la battigia, quella NS la spiaggia sommersa. Gli asterischi indicano l'appartenenza del campione al silt, da cui l'inapplicabilità dell'equazione di Hallermeier (1981).

Sigla Profilo	M_z (phi)	$\tan\beta$	H_b (cm)	T_s (sec)	W_s (cm/sec)	(ε)	(Ω)	RTR
ST1BS	2.30	0.041	50	3	3.71	66.4	4.5	1.60
ST1NS	4.25	0.006	42	3	*	2605.7	*	1.90
ST4BS	2.46	0.045	45	3	2.97	49.6	5.0	1.78
ST4NS	5.38	0.005	45	3	*	4020.2	*	1.78
ST5BS	2.45	0.073	44	3	3.01	18.4	4.9	1.82
ST5NS	2.95	0.006	44	3	1.51	2729.8	9.7	1.82
ST8BS	2.18	0.018	39	3	4.38	268.8	3.0	2.05
ST8NS	2.32	0.012	39	3	3.61	604.9	3.6	2.05
ST12BS	2.74	0.006	37	3	2.01	2295.5	6.1	2.16
ST12NS	3.08	0.009	37	3	1.26	1020.2	9.8	2.16
ST19BS	2.34	0.010	34	3	3.51	759.4	3.2	2.35
ST19NS	2.78	0.010	34	3	1.91	759.4	5.9	2.35
ST20BS	2.16	0.003	31	3	4.50	7693.0	2.3	2.58
ST20NS	2.94	0.012	31	3	1.53	480.8	6.8	2.58

Il parametro di Dean è anche alla base delle classificazioni che tengono conto dell'escursione di marea (Masselink e Short, 1993; Masselink e Hegge, 1995), definendo un'escursione di marea "relativa" (*Relative Tidal Range*) ottenuta dividendo l'altezza d'onda modale alla frangenza per l'escursione media in condizioni di sizigie. Per ciascuno dei profili in Figura 7 si è utilizzato l'altezza d'onda calcola-

ta con il metodo descritto in precedenza, mentre l'escursione di marea sizigiale media è stata considerata uguale a 0.8 m. In Figura 7 sono indicati inoltre i livelli dell'alta (AMS) e della bassa (BMS) marea di sizigie, per aiutare nelle interpretazioni della morfologia. I risultati del calcolo degli indici morfodinamici vengono presentati in Tabella 1 (pagina precedente).

Caratterizzazione morfodinamica delle spiagge

Spiagge in prossimità della foce del Po di Goro

I profili ST1 e ST4 presentati in Figura 7 mostrano la presenza di un barra ben definita a profondità comprese tra -1 e -2 s.l.m.m., ad una distanza tra i 300 ed i 600 m dalla battigia, costituita da sabbia fine. Mentre in prossimità della foce del Po di Goro la barra si presenta larga, costituita da sabbia molto fine e separata dalla battigia da un troguolo ben definito, allontanandosi lungo lo Scanno verso ovest, la barra diventa più "appuntita", il troguolo diventa più largo e sulla parte esterna della barra si trova silt. Da notare sul profilo ST4 la presenza di un "terrazzo di bassa marea" (Masselink e Short, 1993) a profondità di circa -0.5 m s.l.m.m. con larghezza sui 30 m, costituito da sabbia fine. Da notare che la classificazione morfodinamica di questi ultimi autori prevede uno stato di spiaggia al confine intermedio/dissipativo con presenza di sistema barra troguolo, in accordo con ciò che si è rilevato. La barra potrebbe essere collegata all'input sedimentario della barra di foce del Po di Goro o addirittura essa potrebbe essere considerata la continuazione laterale di quest'ultima. Va infine puntualizzato come la battigia presenti valori di parametro di scala del *surf* minori rispetto ai valori ultradissipativi della spiaggia sommersa (Tab. 1).

Spiagge nella parte centrale dello Scanno

Al variare dell'orientazione della linea di costa si nota una corrispondente variazione della morfologia di spiaggia. Il profilo ST5 non mostra la presenza di un sistema barra-troguolo, ma piuttosto una zona a debole inclinazione a profondità tra -1 e -2 m s.l.m.m. occupata da sabbia fine e molto fine. La zona di battigia mantiene le pendenze elevate e la costituzione granulometrica (sabbia fine) osservate nei profili precedenti, con comportamento più riflettente rispetto alla spiaggia sommersa, con valori di parametro di scala del *surf* che prevedono minore probabilità di frangenti di tipo *spilling*. Mentre nel profilo ST5 il terrazzo di bassa marea non è osservabile, esso è presente nella sezione ST8, sempre a circa mezzo metro di profondità (con una larghezza di 40 m), così come osservato nel profilo ST4 ed è costituito da sabbia medio-fine. Da notare inoltre su quest'ultimo profilo di una ben definita "scarpata di erosione" della spiaggia, la cui battigia è costituita da sabbia medio-fine. Usando come criterio il parametro ϵ si nota come nei precedenti profili un differente comportamento morfodinamico tra la battigia e la spiaggia sommersa; il parametro di Dean presenta, invece, valori uguali.

Il profilo S12 della Idroser risulta il più prossimo al ST8 di questo studio. La morfologia risulta essenzialmente comparabile, confermando una tendenza all'assenza della barra, nonostante che la classificazione di Masselink e Short (1993) predica un sistema intermedio-dissipativo con barra come nel caso precedente. L'assenza del sistema barra-troguolo potrebbe essere ricondotta alla tendenza erosiva di questo tratto di costa.

Spiagge nella parte terminale dello Scanno

Andando verso la propaggine occidentale dello Scanno, la barra continua a non essere presente (vedi profili ST20 e ST19), mentre al di sopra del livello -1 m s.l.m.m. si osservano delle piccole barre di battigia (*swash bars*), costituite da sabbia medio-fine, corrispondenti a piccoli digitazioni dello Scanno, che caratterizzano il meccanismo evolutivo della freccia litorale, come descritto da Simeoni et al. (1998b). Da notare che la classificazione di Masselink e Short prevede per queste spiagge uno stato morfodinamico meno dissipativo rispetto ai precedenti, nel caso del profilo ST20 quasi riflettente, con maggiore importanza del parametro di "escursione di marea relativa", il ché potrebbe spiegare le ben formate barre intertidali.

I profili Idroser S6 e S8, eseguiti in questa porzione dello Scanno nel 1993, identificavano già queste morfologie di battigia, per quanto rilevavano sulla sezione S8 una barra poco pronunciata ad una profondità di circa -5 m s.l.m.m. Nel rilevamento oggetto di questo studio la barra non è stata osservata: ciò può essere dovuto a due ragioni. Potrebbe essere che la barra si trova subito oltre il limite verso mare dei profili (che si interrompono proprio alla -5 m s.l.m.m.) oppure che sia assente, essendo dovuta ad eventi di tempesta puntuali, poiché data la profondità a cui era stata rilevata dalla Idroser, non era sicuramente riconducibile alla normale azione del moto ondoso.

Spiagge sull'Isola-Scanno

Anche sull'isola formatasi recentemente in seguito all'apertura artificiale della bocca orientale, la morfologia di spiaggia non presenta barre (vedi sezione ST12). Da notare la presenza sulla zona intertidale di una *swash bar* di sabbia fine. Il profilo ST12, secondo Masselink e Short (1993), sarebbe il più dissipativo di quelli considerati, dove barre multiple dovrebbero essere presenti. I profili Idroser S4 e S2, del 1993, evidenziano sistemi barra-troguolo a profondità comprese tra i -2 e -3 m, ora non più presenti. Inoltre, rispetto a cinque anni prima, il profilo ST12 ha pendenze molto inferiori. Il confronto con il rilievo Idroser è chiaramente più difficile di quanto fatto prima, essenzialmente perché l'area risulta estremamente cambiata rispetto al 1993-1994, essendo fortemente influenzata dall'idrodinamica della bocca piccola.

Conclusioni

L'utilizzo della tecnica GPS in modalità "Cinematica" ha permesso un rilevamento accurato e rapido della linea di costa, per l'intera lunghezza dello Scanno e dell'isoletta che si è creata con l'apertura della bocca piccola.

Il confronto tra le linee di costa rilevate ed altre precedentemente ottenute con metodi fotogrammetrici ha identificato le zone più della fascia di costa più soggette a variazioni, permettendo di mappare in dettaglio morfologie di battigia, corrispondenti a zone di evoluzione della freccia litorale.

I profili di spiaggia hanno delimitato tre zone a diversa morfologia del sistema. Le spiagge più prossime alla foce del Po hanno sistemi barra-troguolo, che però scompaiono spostandosi verso la bocca piccola. Un altro elemento presente sulle spiagge orientali e centrali dello Scanno è un ben marcato terrazzo di bassa marea. La parte centrale dello Scanno riflette il meccanismo di evoluzione del sistema con la presenza di *swash bars* emergenti a bassa marea.

Il confronto con profili eseguiti cinque anni prima (Idroser, 1994), seppur non esattamente coincidenti con quelli di questo studio, ha identificato una variazione morfologica nella parte terminale dello Scanno e sull'isoletta, con scomparsa di barre lungocosta e nascita di *swash bars*.

Ringraziamenti

Si ringraziano A. Bertoni, A. Borghesi, A. De Nardo, L. Zanetti, che hanno partecipato alle campagne di rilevamento, in particolare il Dott. Giorgio Fontolan per gli utili suggerimenti forniti e la disponibilità a partecipare ai rilevamenti. Si ringrazia inoltre l'equipaggio del battello Hydra per l'appoggio dato e G. Calderoni per l'assistenza in laboratorio. Lo studio è stato condotto con finanziamenti della Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura (responsabile U. Simeoni), ex 60% (responsabile U. Simeoni) e del fondo COFIN 98 (responsabile R. Dal Cin) del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (M.U.R.S.T.).

Bibliografia

- Carobene L. e Brambati A. (1975) - *Metodo per l'analisi morfologica quantitativa delle spiagge* - Bollettino della Società Geologica Italiana, 94: 479-493.
- Ciavola P. (1991) - *Spurn Heritage Coast: un esempio di modellistica costiera e salvaguardia ambientale* - Memorie della Società Geologica Italiana, 47: 685-700.

- Ciavola P. (1997) - *Coastal Dynamics and Impact of Coastal Protection Works on the Spurn Head Spit (United Kingdom)* - Catena, 30: 369-389.
- Dail H.J., Merrifield M.A. e Bevis M. (2000) - *Steep beach morphology changes due to energetic wave forcing* - Marine Geology, 162: 443-458.
- Dal Cin R. (1994) - Lo scannone di Goro nel Delta del Po: evoluzione morfologica e possibili interventi per conservare l'ambiente della laguna retrostante - In: *Sacca di Goro: studio integrato sull'ecologia*, FrancoAngeli, Ferrara, pp. 291-303.
- Dean R.G. (1973) - *Heuristic models of sand transport in the surf zone* - Proceedings of the Conference on Engineering Dynamics of the Coastal Zone, Sidney, N.S.W., Australia, pp. 208-214.
- Folk R.L. (1974) - *Petrology of Sedimentary Rocks* - Hemphill Publishing Company, Austin, Texas, USA, pp 183.
- Gatti M. (1996) - *L'utilizzo della rete internazionale IGS per la determinazione delle coordinate di vertici GPS*. Bollettino della SIFET, 3: 105-120.
- Gatti M., Pellegrinelli A. e Russo P. (1995) - *Un contributo allo studio sperimentale del sistema GPS "Real Time Kinematic Survey"* - *On The Fly*.- Bollettino della SIFET, 3: 107-116.
- Gorman L., Morang A. e Larson R. (1998) - *Monitoring the coastal environment; part IV: mapping, shoreline changes, and bathymetric analysis* - Journal of Coastal Research, 14: 61-92.
- Guza R.T. e Inman D.L. (1975) - *Edge waves and beach cusps*. - Journal of Geophysical Research, 80: 2997-3012.
- Hallermeier R.J. (1981) - *Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains* - Sedimentology, 28: 859-865.
- Hydrographic Office (1991) - *Tidal prediction by the Admiralty simplified harmonic method*. Version 2.0, Hydrographic Office, Tauton, UK.
- Idroser (1996) - *Progetto di Piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia Romagna*. Regione Emilia Romagna, Bologna. pp. 365.
- Irish J.L. e Lillycrop W.J. (1999) - *Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system* - ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54: 123-129.
- Masselink G. e Hegge B. (1995) - *Morphodynamics of meso- and macrotidal beaches: examples from central Queensland, Australia* - Marine Geology, 129: 1-23.
- Masselink G. e Short A.D. (1993) - *The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model* - Journal of Coastal Research, 9: 785-800.
- Med Ingegneria (1998) - *Applicazioni di modellistica numerica per lo studio dell'evoluzione dello scanno della Sacca di Goro e l'analisi idrodinamica delle bocche lagunari*. Med Ingegneria, S.r.l., Ferrara.
- Rijkswaterstaat (1990) - *A new coastal defence policy for the Netherlands* - Rijkswaterstaat, Gravenhage, Paesi Bassi, pp. 103.
- Simeoni U., Borghesi A., Calderoni G., Ciavola P., Fontolan G., Gatti M., Gonella M., Tessari U. e Zamariolo A. (1998a) - *Analisi previsionale dell'evoluzione dello Scanno e della Sacca di Goro. Relazione finale*. Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura, Servizio Sviluppo Agro-alimentare, Bologna. pp 273.
- Simeoni U., Ciavola P., Fontolan G., Mazzini E. e Tessari U. (1998b) - *Centennial evolution of a recurved spit: a case study from the spit of the Goro Lagoon, Po Delta Italy* - 35th CIESM Congress Proceedings, CIESM, Dubrovnik, pp. 100-101.
- Wright L.D. e Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis* - Marine Geology, 56: 93-118.

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