

6. Tecniche di monitoraggio dell'evoluzione delle spiagge



Sara Carli*, Luigi E. Cipriani**, Deborah Bresci*, Chiara Danese*, Pierluigi Iannotta*, Enzo Pranzini*, Lorenzo Rossi*, Lilian Wetzel*

* *Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze;*

** *Regione Toscana - Direzione Generale delle Politiche Territoriali e Ambientali*

Hanno collaborato: Acquater, Paolo Aminti, Dipartimento di Ingegneria civile dell'Università degli Studi di Firenze, GeCo, Geo Coste, Geomarine, Microgeo, Gabriele Pini, Seatech, Studio Aria, Tenix

Premessa

Il monitoraggio dell'evoluzione delle spiagge riveste un ruolo fondamentale in ogni politica territoriale in cui sia coinvolta la fascia litorale. La zona costiera concentra infatti circa 2/3 della popolazione mondiale e in molti paesi supporta una florida attività turistica (Clark, 1996). Dato che la spiaggia costituisce l'elemento di maggior valore economico del sistema costiero, ma anche quello più fragile e più soggetto a variazioni morfologiche che ne modificano la funzione protettiva dei territori retrostanti e le potenzialità di utilizzazione a fini turistico ricreativi, lo studio della evoluzione dei litorali è fondamentale per la pianificazione di questa zona densamente popolata, economicamente interessante ma anche complessa e dinamica.

La Gestione Integrata della Fascia Costiera (Integrated Coastal Zone Management/ICZM) è un processo decisionale continuo che ha lo scopo di risolvere i conflitti derivati dalla diversità di utilizzo di questa complessa parte del territorio. Fra i vari aspetti che un programma di gestione integrata della fascia costiera deve affrontare, vi sono la gestione delle spiagge, il controllo dell'erosione costiera e dei rischi naturali, per cui un input di dati specifici è necessario perché si possa condurre tal programma in una forma scientificamente coerente. Alcuni dei problemi tipici di gestione includono il controllo della erosione delle spiagge, la progettazione di ripascimenti artificiali, la realizzazione e il controllo di opere di difesa, la definizione di linee di *set-back* per la costruzione e quella di zone di rischio, che dipendono tutti dalla valutazione precisa della evoluzione morfodinamica costiera (Cicin-Sain, 1998).

È per questo che nell'ambito del Progetto Beachmed INTERREG IIIB Medoc, avente come tema centrale il recupero ambientale dei litorali in erosione attraverso l'utilizzo dei depositi di sabbia marini, è stata dedicata una particolare importanza alla valutazione dell'applicabilità e del-

l'accuratezza dei metodi di rilievo delle spiagge, per giungere alla definizione di criteri oggettivi sui quali possa essere impostato un programma di monitoraggio.

Oscillazioni della posizione della linea di riva e del volume della spiaggia emersa su tempi brevi (dell'ordine compreso fra il giorno e l'anno) intorno a valori relativamente stabili sul lungo periodo sono la conseguenza della discontinuità degli input fluviali e del succedersi dei diversi eventi meteomarini e la loro identificazione e determinazione può consentire di evitare interventi di stabilizzazione del litorale non necessari e spesso dannosi per le spiagge stesse e per i tratti contigui.

Variazioni degli stessi parametri, che dimostrino un trend ben definito su tempi medio/lunghi (dell'ordine degli anni) impongono, al contrario, interventi normativi e strutturali che possono essere definiti solo sulla base di una esatta quantificazione dei processi, sulla determinazione delle cause e sulla previsione della efficacia delle soluzioni proposte.

Appare quindi evidente che la valutazione dello "stato" del litorale (Clark, 1996), qui analizzato solo nella sua componente fisica (ma è certo che analoghe considerazioni debbano essere fatte per tutte le altre componenti del sistema costiero) costituisce un punto determinante e qualificante nelle politiche territoriali.

Obiettivi del monitoraggio

Gli obiettivi diretti del monitoraggio possono essere riassunti nella tabella seguente, che non è certamente esaustiva, ma che mostra l'interesse e la vastità delle problematiche connesse a questa attività:

- studio dell'evoluzione costiera a medio/lungo termine per l'impostazione di piani di sviluppo e di gestione;
- analisi del bilancio sedimentario del litorale

- per lo studio dei rapporti fra input fluviale e dispersione cross- e long-shore dei materiali;
- studio dell'evoluzione costiera a breve termine per la valutazione dell'impatto delle opere marittime;
- studio dell'evoluzione costiera a breve termine per la valutazione dell'efficacia degli interventi di difesa;
- determinazione dell'estensione e della qualità dell'arenile ai fini dell'ottimizzazione degli usi e della determinazione dei canoni demaniali;
- compartecipazione dei dati con gli stakeholders per la certificazione degli obiettivi raggiunti nei processi di ICZM (Cicin-Sain, 1998).

L'impostazione di un sistema di monitoraggio dell'evoluzione costiera è quindi un momento importante nel processo di ICZM e l'efficacia dello stesso deriva dalla scelta della scala d'indagine, delle procedure di misura e della tempistica associata, parametri tutti che dipendono dagli obiettivi che si intendono raggiungere e dalle risorse finanziarie disponibili.

Requisiti tecnici di un programma di monitoraggio

Una corretta impostazione dovrà quindi identificare le metodologie di rilievo e di analisi dei dati più idonee senza incorrere in un sovra-campionamento, spaziale e temporale, che rende più costoso il sistema.

Nell'impostazione del monitoraggio si dovrà quindi privilegiare:

- *la possibilità di acquisizione dei dati con la tempistica prevista.* Ciò è particolarmente importante nel monitoraggio di breve termine, quando devono essere acquisiti dati su sistemi in rapida evoluzione, come le spiagge soggette ad interventi di ripascimento o di stabilizzazione con opere a mare, nei quali le variazioni morfologiche possono essere estremamente rapide;
- *l'accuratezza dei dati.* Piccole variazioni morfologiche implicano lo spostamento di ingenti volumi di sedimenti e errori modesti nelle misure determinano forti errori nella quantificazione dei processi coinvolti. In aggiunta, le identificazioni di errori di misura, anche grossolani, è estremamente difficile nella spiaggia sommersa e la variabilità morfologica del sistema, conseguente anche ad una singola mareggiata, rende impossibile la ripetizione della singola misura eventualmente sospettata di errore;

- *operatività dei sistemi di acquisizione.* La necessità di avere misure sinottiche su ampie superfici e in finestre temporali spesso assai ristrette (es. intervallo fra due mareggiate in periodo invernale) impone l'impiego di metodologie collaudate e rapidamente attuabili;
- *l'economicità delle procedure.* L'elevata frequenza dei rilievi necessaria per un monitoraggio di breve/medio termine e l'estensione temporale dei monitoraggi di lungo periodo, associata all'ampiezza delle zone che spesso è necessario mettere sotto osservazione, impongono la scelta di metodologie di rilievo economicamente sostenibili, anche per evitare che il monitoraggio possa essere interrotto per carenza di risorse finanziarie;
- *la velocità di elaborazione.* In molti casi è indispensabile poter disporre dei dati e delle loro elaborazioni in tempi estremamente rapidi. Alcuni sistemi di acquisizione (ad esempio dei dati rilevati da satellite) richiedono tempi relativamente lunghi per la fornitura del dato; altri (ad esempio quelli acquisiti con sistemi Lidar) hanno tempi di processo incompatibili con la necessità che talvolta si pone di prendere decisioni rapide in fasi operative di realizzazione dei progetti;
- *confrontabilità dei dati.* I dati devono essere acquisiti con procedure collaudate e ampiamente adottate, in modo che la loro validità sia universalmente accettata, sia dai soggetti direttamente coinvolti nei processi decisionali che dagli "stakeholders" le cui aspettative si basano sulle decisioni stesse. La confrontabilità dei dati consente anche lo scambio fra le varie esperienze, la valutazione e la comparazione fra diversi problemi esistenti e il confronto fra i risultati raggiunti in diversi interventi.

Nell'analisi dell'evoluzione costiera conseguente ad interventi di riequilibrio, siano essi basati su opere rigide che si ripascimenti artificiali, si richiede una definizione delle condizioni di partenza, non facili a determinare proprio per la variabilità intrinseca del sistema. Il rilievo *una tantum* della costa, spesso effettuato nel *momento zero* del monitoraggio, non consente di evidenziare quelle dinamiche che vanno a sovrapporsi ai processi innescati dall'intervento e che possono ostacolare una corretta interpretazione dei dati e la corretta valutazione dell'efficacia dell'intervento. Quando si vanno ad effettuare interventi su litorali per i quali sono note solamente le tendenze di lungo periodo e non la variabilità di breve termine (es. stagionale), è quindi opportuno che il monitoraggio inizi assai prima del momento zero, in modo che possa emergere la variabilità intrinseca del sistema.

Altro aspetto fondamentale è la delimitazione

della zona da sottoporre a monitoraggio e la definizione della scala dei documenti da produrre.

Per l'analisi delle tendenze evolutive di medio e lungo termine l'entità di riferimento è l'unità fisiografica, definita come quella estensione di spiaggia che non ha scambi sedimentari con tratti adiacenti. È solo all'interno di essa che si possono analizzare i flussi sedimentari e capire se determinate variazioni morfologiche sono dovute ad oscillazioni del sistema, ma non a perdite nette, o se invece non sono il prodotto di un deficit sedimentario alterato del sistema complessivo.

Monitoraggi impostati per valutare l'impatto di strutture costiere, in genere porti commerciali o turistici, devono avere come zona di studio un tratto di litorale di estensione almeno pari a un ordine di grandezza superiore a quella dell'opera, dato che solo l'impatto istantaneo dell'opera sui processi costieri si sviluppa per una lunghezza che va da una a tre volte la dimensione maggiore dell'opera.

È evidente che l'impatto dell'opera può alterare nel breve e medio termine le dinamiche sedimentarie del tratto posto immediatamente sottoflutto, ma che questo impatto può propagarsi in tempi più lunghi a tutta l'unità fisiografica. I tempi di analisi dei due processi e la scala spaziale del monitoraggio sono necessariamente diversi.

La rappresentazione cartografica dei parametri che descrivono le variazioni morfologiche intervenute può oscillare fra 1:1.000 e 1:5.000, ma è comunque richiesta una accuratezza planimetrica del dato digitale di 1-5 cm ed una altimetrica di circa 10 cm in modo da poter effettuare analisi estremamente accurate. Data la modesta energia del rilievo delle spiagge, sia nella parte emersa che in quella sommersa, fatta eccezione per le aree dunari, un errore nel posizionamento dei punti di 1-10 cm non determina significative deformazioni o stime inesatte dei volumi dei sedimenti di spiaggia. Un'accuratezza di 5 cm nelle quote, e di 10 cm nei confronti fra coppie di rilievi, consente di evidenziare variazioni morfologiche nell'intorno delle opere, in genere di un ordine di grandezza superiore, ma non di effettuare accurate stime del bilancio sedimentario dei litorali. Infatti, per profili attivi di spiagge di ampiezza pari a 1000 m, un caso frequente lungo le coste italiane, l'incertezza risulta essere pari a circa 100 m³ per metro lineare di spiaggia, una quantità analoga a quella che caratterizza ripascimenti del litorale di medie dimensioni.

Aree d'applicazione delle metodologie di rilievo

L'area individuata per l'applicazione e le verifiche delle metodologie di rilievo, di seguito trattate, riguarda il litorale della costa Toscana compreso fra

Viareggio e Livorno (Fig. 1).

Il tratto di costa individuato ha una lunghezza di circa trenta chilometri. Per i rilievi in mare è stata scelta la profondità di dieci metri come limite massimo, che all'incirca corrisponde alla profondità di chiusura per mareggiate con tempo di ritorno di circa 50 anni.

All'interno di questo litorale è stato identificato il tratto di costa compreso fra la foce dell'Arno e quella del Fiume Morto (PI) per monitoraggi di maggior dettaglio atti a valutare la precisione dei metodi impiegati (Fig. 1b).

Questa zona, appartenente alla Tenuta di San Rossore, è stata scelta in quanto vi sono importanti processi evolutivi in atto, con tassi di arretramento della linea di riva di oltre 10 metri all'anno. Inoltre si tratta di un'area di elevato pregio naturalistico e, cosa importante in questa fase della sperimentazione in cui è necessario lasciare la strumentazione in loco, è costantemente sorvegliata. Quest'area si presenta anche molto differenziata in quanto vi sono, nel tratto meridionale, strutture di difesa ortogonali a costa e, in quello centrale, opere parallele (scogliere del Gombo; Fig. 1c), mentre un tratto, quello settentrionale, è privo di qualsiasi struttura.

Ulteriori zone come la spiaggia di Alassio, in Liguria, ed i Golfi di Procchio e di Baratti, in Toscana, sono oggetto di ulteriori monitoraggi. Sono state inoltre acquisite immagini da satellite dell'intera costa toscana, dove, in contemporanea con l'acquisizione del satellite è stata rilevata la posizione della linea di riva.

Scopo dello studio è quello di valutare le varie metodologie di rilievo disponibili in termini di:

- precisione assoluta richiesta;
- estensione del tratto da monitorare;
- morfologia della spiaggia emersa e sommersa;
- densità di punti per unità di superficie richiesta;
- empi di rilievo, in funzione anche della velocità nelle variazioni ricercate;
- costi.

In base ai criteri di economicità e di corretto impiego delle tecniche di rilievo sono stati determinati i seguenti elementi:

- precisione nella materializzazione degli eventuali punti di inquadramento;
- strumentazione da impiegare;
- tempo necessario al rilievo (espresso in giornate lavorative consecutive) e alla successiva restituzione analitica e grafica delle misure (in base alle specifiche richieste e alla scala di rappresentazione);
- costo complessivo del rilievo.

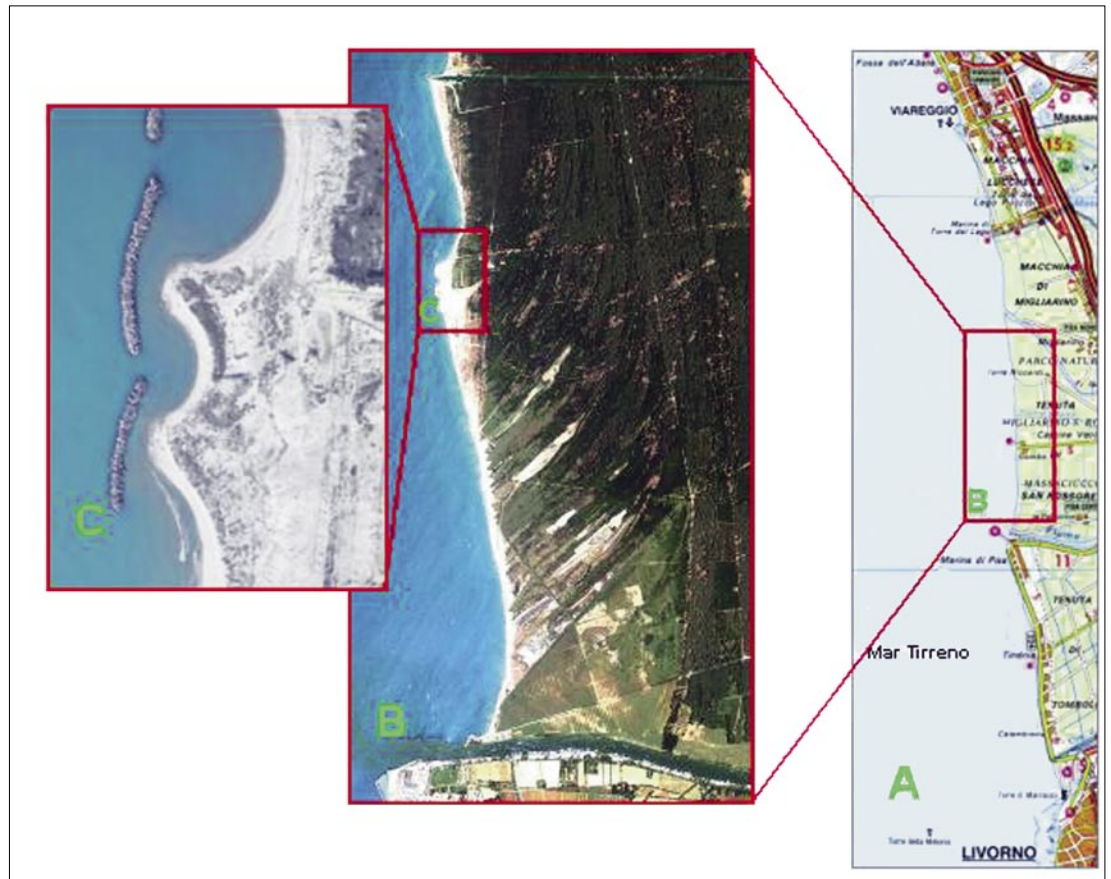


Figura 1 Area campione della Tenuta di San Rossore (Pisa)

Per pianificare i metodi di confronto più adeguati e anche per proporre i corretti tempi di monitoraggio, si rende opportuno, anche attraverso rilievi sperimentali, arrivare all'approfondimento nella definizione di alcune convenzioni nella descrizione degli elementi morfologici in questione e nelle modalità di rilievo e restituzione.

Sono stati analizzati, in una prima fase, rilievi effettuati in precedenza sulla costa toscana e valutata la loro accuratezza:

- rilievo per scansione laser terrestre di spiaggia e scogliere a Marina di Massa (Aminti, 2002);
- rilievo topografico e fotogrammetrico con metodi integrati della laguna di Orbetello. (Aminti, in stampa).

Nell'area di test della Tenuta di San Rossore sono state eseguite le seguenti operazioni:

- inquadramento geodetico con GPS e livellazione (Area A);
- rilievo per scansione laser terrestre (Area C);
- rilievo per punti mediante GPS geodetico "RTK" (Area C);
- rilievo per sezioni mediante stazione totale (Area B);

- rilievo LIDAR con acquisizione contemporanea di immagini da camera digitale e da sensore multispettrale (Area B);
- rilievo batimetrico con ecoscandagli single e multibeam (Area B);
- rilievo periodico della linea di riva (Area B);
- elaborazione di immagini da satellite a diversa risoluzione (Area A);
- rilievo con immagini digitali da aereo per una copertura stereoscopica;
- rilievo per punti mediante differenti configurazioni GPS ed con diverse correzioni differenziali;
- rilievi di tratti di spiaggia con telecamera digitale fissa.

È stata inoltre valutata la possibilità di applicazione delle seguenti metodologie:

- rilievo con LIDAR marino ad elevata penetrazione per il rilievo contemporaneo di spiaggia emersa e sommersa;
- rilievo batimetrico con interferometro.

Metodi di acquisizione dei dati della spiaggia emersa

Rilievo topografico diretto

I rilievi topografici tradizionali vengono effettuati oramai con l'utilizzo delle Stazioni Totali. Per stazione totale (traduzione letterale dell'inglese *Total Station*) si intende un goniometro a lettura digitale dei cerchi dotato di distanziometro con portata e precisioni variabili. Salvo problemi di sicurezza dell'attrezzatura, alcune stazioni totali non hanno bisogno di operatori: seguono il prisma riflettente collimandolo con continuità e aggiornandone la posizione. Vale la pena accennare alla necessità di dotare, per i rilievi delle spiagge, l'asta (palina) che sostiene il prisma riflettente di un terminale inferiore piatto, in modo da evitare errori dovuti alla infissione della palina stessa nella sabbia.

Il rilievo con stazione totale necessita di un inquadramento che consiste in quell'insieme di operazioni che conducono alla materializzazione e alla determinazione della posizione di un numero discreto di punti. La precisione della rete viene certificata tramite il calcolo della compensazione delle misure eseguite, che fornisce i parametri statistici sugli errori di posizione di tutti i vertici (scarti quadratici medi, ellissi standard). Generalmente si stabilisce un errore di posizione massimo in relazione allo scopo del rilievo e comunque alquanto inferiore alla precisione nominale della cartografia da produrre.

Particolare attenzione deve essere rivolta alla materializzazione dei punti nodali della rete di inquadramento (capisaldi), infatti la durabilità nel tempo del manufatto e la stabilità del contrassegno fisico (centrino) costituiscono un prezioso elemento per tutte le operazioni di monitoraggio della evoluzione temporale dei litorali.

Il rilievo di dettaglio della spiaggia emersa si svolge per sezioni tra loro parallele ed ortogonali alla linea di riva. La spaziatura tra le sezioni e il numero dei punti che convenientemente possono essere rilevati nell'unità di lunghezza della sezione (punti al metro o punti per ettometro) dipende dalla precisione e dallo scopo del rilievo della spiaggia e da criteri di economicità del rilievo.

Generalmente il rilievo è finalizzato, oltre che alla documentazione della geometria della spiaggia, anche al calcolo del volume di un tratto di costa sabbiosa (rispetto a un piano di riferimento), per lo più utilizzato nel monitoraggio dell'evoluzione del litorale e/o nel collaudo di interventi di ripascimento artificiale.

Uno dei problemi da affrontare è quello relativo alla spaziatura dei punti del rilievo al fine di raggiungere il miglior compromesso fra accuratezza nella descrizione della superficie della spiaggia e tempi e costi impiegati. Data la forte irregolarità



Stazione Totale con prisma

Figura 2

della spiaggia, una soluzione al problema può essere ricercata attraverso la seguente formulazione (Aminti e Aminti, 1997 e 1999):

$$s'v = k \cdot \sqrt{L} \cdot l \cdot x$$

dove: $s'v$ = s.q.m. del volume calcolato per effetto della irregolarità della spiaggia [m^3]; k = coefficiente empirico variabile da 0.005 a 0.020 a seconda del grado di irregolarità (media) della spiaggia (ondulazione altimetrica e/o planimetrica); L = lunghezza della spiaggia rilevata; l = profondità dell'area interessata al rilievo [m]; x = intervallo medio tra le sezioni [m].

Applicando la teoria della propagazione quadratica di Gauss, si possono poi ricavare i valori della precisione che si può ottenere in base alla qualità del rilievo delle sezioni:

$$s''v = sz \cdot \sqrt{A} \cdot y \cdot x$$

dove: sz = s.q.m. che indica la precisione media delle quote misurate [m]; A = area interessata al rilievo [m^2]; y = intervallo medio tra i punti consecutivi lungo una sezione [m]; x = intervallo tra le sezioni [m].

Infine, è necessario tenere conto, nelle ripetizioni dei rilievi, di un eventuale errore sistematico dovuto a una errata determinazione della quota del

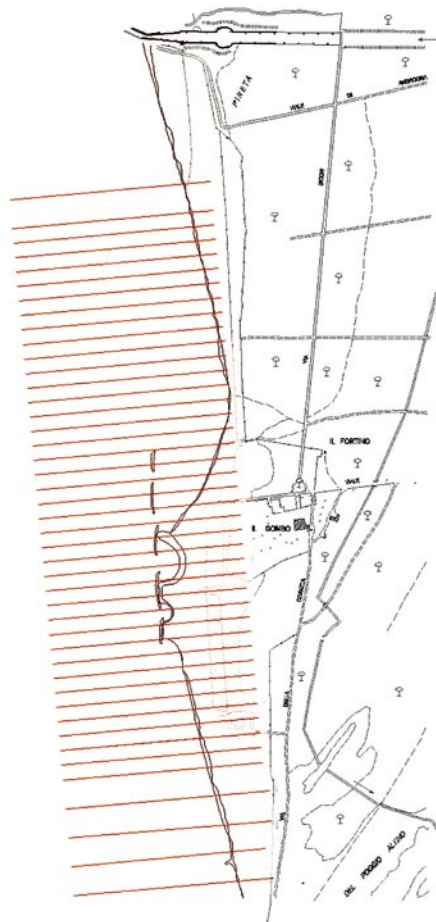


Figura 3

Esempio di spaziatura delle sezioni parallele in un rilievo di spiaggia (Gombo; Tenuta di San Rossore)

punto di riferimento (che dovrà essere opportunamente materializzato e collegato a una serie di capisaldi diffusi sull'area in oggetto).

$$s'''v = ez \cdot A$$

dove: ez = errore (sistematico) sulla quota origine del rilievo [m]; A = area interessata al rilievo [m²].

In prima approssimazione si può considerare un DEM ben determinato dal rilievo topografico se il numero dei punti rilevati è almeno doppio di quello dei nodi della maglia quadrata che costituisce il modello.

Per quanto riguarda la precisione nel calcolo dei volumi di spiaggia basato su un DEM si può considerare la seguente espressione:

$$sv = l \cdot \sqrt{A} \cdot sh + ez \cdot A$$

dove: sv = precisione del volume calcolato [m³]; l = misura del lato della maglia [m]; A = superficie della zona di spiaggia interessata [m²]; sh = precisione (s.q.m.) altimetrica dei nodi del DEM [m]; ez = errore (sistematico) sulla quota origine

del rilievo [m].

Sulla base delle formule riportate precedentemente, è necessario sottolineare l'apporto fornito dai vari fattori che determinano errori nella valutazione dei volumi di spiaggia: infatti la soluzione ottimale, sia sotto il profilo economico, sia sotto quello squisitamente tecnico-scientifico, può derivare solo da un attento esame e da un "bilanciamento" tra le componenti l'errore considerato.

Per chiarire questa affermazione serviamoci di un esempio concreto: data un'area $A = 1 \text{ km}^2$, rilevata mediante DTM di lato $l = 1 \text{ m}$, con uno s.q.m. $sh = 10 \text{ cm}$ sulle quote dei nodi della maglia quadrata, e un errore assoluto sul riferimento altimetrico risulti $ez = 1 \text{ mm}$, si ottiene che:

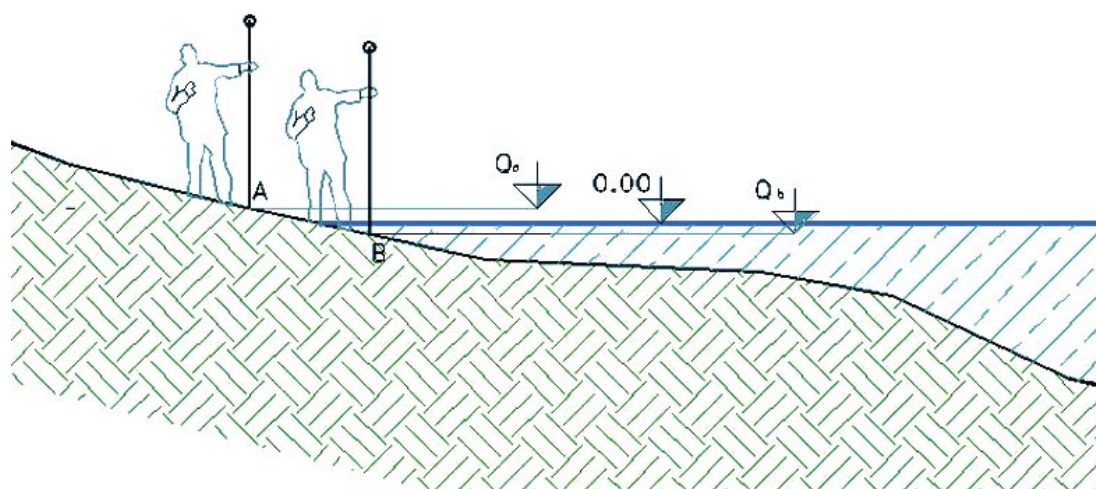
$$sv = 100 + 1000 = 1100 \text{ m}^3$$

Come si vede, la modesta precisione sulle quote dei nodi del DEM porta a un contributo (primo addendo) quasi trascurabile se confrontato con quello (secondo addendo) dovuto a una misura (molto più precisa) della quota di riferimento. Questo esempio porta a una riflessione critica molto importante circa l'inutilità e la anti-economicità di prescrizioni rigide sulla qualità dei rilievi topografici, soprattutto se non accompagnate da accorgimenti doverosamente molto severi sulle modalità di materializzazione, di monitoraggio, di manutenzione e di rilievo dei punti di riferimento delle quote.

Tenendo conto del fatto che i ripascimenti artificiali in Italia sono più spesso realizzati con volumi dell'ordine di $100000 \text{ m}^3/\text{Km}$, l'errore nella stima di variazione di volume fra due rilievi successivi è dell'ordine di $1\%-5\%$. Errori pseudo-sistematici, dovuti alla scarsa precisione del controllo del livello di riferimento del mare o a non perfetta taratura degli ecoscandagli, danno origine ad errori di ordine di grandezza maggiori rispetto a quelli dovuti al rilievo delle sezioni ed alla loro spaziatura (Aminti e Aminti, 1999).

Vista la difficoltà a eseguire un rilievo per sezioni, e ove si intenda privilegiare una conoscenza più omogenea della morfologia della spiaggia ed eventualmente anche di opere di difesa o affioramenti rocciosi presenti, si può articolare il rilievo in modo da ottenere la posizione altimetrica dei punti nodali di una rete regolare a maglia generalmente quadrata con distanza fra i vertici inversamente proporzionale alla complessità del terreno da rilevare.

Per quanto riguarda il rilievo della linea di riva non ci sono grandi problemi dal punto di vista del rilievo strumentale, in quanto l'approssimazione massima richiesta ($\pm 20 \text{ cm}$ in planimetria e $\pm 5 \text{ cm}$ in quota) non è difficilmente raggiungibile. Più complesso è invece il problema della definizione



Rilievo della linea di riva mediante 2 "passaggi" a quote diverse

Figura 4

della linea stessa, in quanto variabile con la marea e la pressione atmosferica, con la direzione e intensità del vento e con molteplici altri fattori. Data inoltre la disomogeneità dei riferimenti altimetrici assoluti (i capisaldi IGM sono relativamente scarsi, le reti presenti nei pressi delle spiagge sono talvolta riferite a origini diverse) si capisce che i rilievi, per risultare ripetibili nel tempo e confrontabili, necessitano di alcuni accorgimenti specifici (materializzazione di capisaldi livellati e riferiti alla rete IGM) che non sono sempre adeguatamente considerati sia in fase di progettazione che in fase di esecuzione del rilievo.

Ammettendo che questo problema sia affrontato con sufficiente accortezza, resta da definire la linea di riva; convenzionalmente si hanno 2 riferimenti non coincidenti (ci sono mediamente 20-25 cm di differenza):

- la linea del livello di riduzione degli scandagli (LRS) definita nelle carte italiane come livello medio delle basse maree sigiziali che è la linea batimetria 0.00 m;
- la linea del livello massimo dell'acqua nell'ultima alta marea (HWL = High Water Level) definita come contorno della sabbia bagnata subito dopo l'evento di alta marea, più adatta ai rilievi da terra o da immagini;
- la linea del livello coincidente con lo zero I.G.M, ovvero a quota ortometrica 0.00 m. Ricordiamo che la quota ortometrica di un punto è la sua distanza verticale rispetto alla superficie di riferimento del geode.

Si capisce che le prime due convenzioni, oltretutto in contrasto tra di loro, prescindono da quello che sulle coste italiane è il fattore predominante nella determinazione del livello del mare, cioè dalle condizioni meteo-marine. Per evitare confusioni e dare un riferimento univoco ai rilievi si suggerisce di utilizzare la terza convenzione, ovvero di identificare la linea con la isoipsa

0.00 metri (ortometrica), in modo da svincolarsi dai fenomeni di variabilità circadiana o legati alle condizioni meteorologiche. Per ottenere il risultato costituito dalla identificazione dei punti di quota ortometrica 0.00 metri utilizzando un rilievo tradizionale con stazione totale, è possibile eseguire un doppio rilievo, passando una prima volta sul contorno asciutto della riva, in modo da avere punti in quota sicuramente positiva e una seconda volta tenendo la palina con l'estremità inferiore immersa nell'acqua, fino all'eventuale soglia di un cambio di pendenza della sezione bagnata. In questo modo (Fig. 4) anche se la seconda quota risultasse positiva, sarà possibile, con una semplice interpolazione lineare, ricavare la posizione planimetrica del punto di quota zero. L'indicazione analitica della pendenza della battigia così ottenuta è inoltre utile per traslare la linea di riva dedotta da immagini aeree o da satellite, sulla sua corretta posizione riferita allo "0" IGM, eliminando l'effetto dovuto alla variazione del livello marino al momento della presa.

Per il calcolo dello spostamento della linea di riva, nell'ambito del progetto Beachmed, è stato implementato un apposito software (applicativo di AutoCAD), fruibile da tutti i partner del progetto in maniera da utilizzare una procedura unica e comune per questo tipo di analisi.

La prima operazione del software consiste nella suddivisione del tratto di spiaggia in settori. Per fare ciò è necessario definire la linea di riferimento, la lunghezza delle linee di separazione e la spaziatura delle linee di separazione dei settori stessi. I settori vengono poi numerati in modo automatico dal programma. Una volta suddiviso il tratto di spiaggia in settori è possibile procedere al calcolo

della aree di ogni settore. Il procedimento è molto semplice e selezionando la linea di riferimento, le linee di separazione dei settori, la linea di riva e i centroidi delle aree si delimitano le aree racchiuse tra linea di riferimento da un lato e dalla linea di riva dall'altro.

Il programma permette poi di procedere all'estrazione delle aree dei settori direttamente su foglio Excel© nel quale vengono riportati: il numero, la lunghezza e l'area di ciascun settore. Questa procedura può essere impiegata per il calcolo di aree delimitate da un numero infinito di linee di riva.

Per il progetto Beachmed è stato effettuato un rilievo con Stazione Totale che ha interessato sia un'area che si estende per circa sei chilometri dalla foce del Fiume Morto a quella del Fiume Arno che una di circa un chilometro posta a sud dell'abitato di Marina di Pisa. Per entrambe le zone si è ritenuto importante ripetere le rilevazioni su linee eseguite in studi precedenti.

Sulla prima zona le sezioni parallele di rilievo sono state portate ad un intervallo di 100 metri dai 250 metri originari del rilievo del 1996/97 ripetendo i rilievi sulla zona del Gombo con sezioni distanziate di 50 metri (Fig. 3).

Per quel che riguarda l'inquadramento geodetico, nel 1996 fu eseguita una poligonale di precisione dal Porto di Viareggio al Porto di Livorno con caposaldi ogni due chilometri. Questa poligonale, collegata agli estremi ai capisaldi di livellazione IGM di Viareggio e di Stagno, fu eseguita con osservazione delle reciproche zenitali contemporanee; ciò permise una valida determinazione della quota.

Per il nostro rilievo si è scelto di derivare le osservazioni dalla rete determinata in quella occasione; ciò ha permesso di non introdurre discontinuità nella determinazione dell'evoluzione costiera. Dal momento che parte dei capisaldi necessari ad effettuare i rilievi erano andati perduti, è stata realizzata una nuova poligonale di infittimento lungo il litorale della Tenuta di San Rossore. La poligonale è stata realizzata con due strati per le osservazioni angolari e con la contemporaneità delle reciproche zenitali; è stata quindi chiusa sul punto di origine, realizzando un anello di circa 14 chilometri con i seguenti errori di chiusura:

- angolare: 0.0001 m;
- lineare: 0.050-0.007 m;
- quota: 0.013 m.

Dai nuovi capisaldi così determinati, si sono eseguiti i rilievi topografici dei completamenti a terra delle sezioni ed i rilievi della linea di riva.

Il rilievo topografico dei completamenti a terra delle sezioni è stato realizzato individuando ogni linea di progetto con due paline sull'allineamento. Tramite un apposito software, che permette di

individuare gli scostamenti di ogni punto battuto dalla linea scelta, l'elaboratore è collegato allo strumento topografico (Pentax PTS10) e, contestualmente alla registrazione dei dati, visualizza numericamente gli spostamenti da realizzare per portarsi sulla linea progettata. Questi vengono comunicati al canneggiatore che si sposta fino a raggiungerla con sufficiente precisione, una volta realizzato l'allineamento ne rileva i punti caratteristici.

Il rilievo celerimetrico della linea di riva viene effettuato determinando una coppia punti scelti in modo che si pongano da parti opposte all'isoipsa zero e con intervalli di circa 5 metri di costa, o ogni qualvolta vi siano variazioni morfologiche evidenti. In ciascun punto la linea di riva viene poi individuata con interpolazione lineare.

Global Positioning System (GPS)

Il rilievo GPS con ricevitori geodetici che registrano i dati per le misure di fase consente elevate precisioni nel posizionamento differenziale tra i centri di fase di 2 antenne poste agli estremi di una linea di misura (*baseline*) la cui lunghezza, orientata nel sistema cartesiano geocentrico, può essere determinata con precisione nell'ordine del centimetro.

I ricevitori possono utilizzare la sola frequenza L1 (monofrequenza) o entrambe le frequenze L1 e L2 (bifrequenza) dei segnali emessi dai satelliti del sistema; in questo caso (Fig. 5) la rapidità, l'accuratezza nella determinazione della posizione e la distanza massima raggiungibile rispetto alla stazione di riferimento vengono considerevolmente aumentate.

La portata utile, in dipendenza dal tipo di ricevitore e dal tempo di stazionamento che si è previsto di adottare in funzione della tipologia del rilievo, varia da 5 a 30 Km (con sistemi di collegamento tra stazioni di riferimento, tipo VRS (*Virtual Reference Stations*), si potranno estendere tali limiti). Le prospettive di ampliamento delle risorse costituite dalle reti di stazioni permanenti di riferimento gestite dagli enti pubblici territoriali sono un fattore importante, che potrà ulteriormente incrementare l'applicabilità e la produttività di questo sistema.

Il rilievo di spiaggia si presta particolarmente all'impiego delle misure GPS, in quanto le coste sabbiose italiane sono raramente caratterizzate dalla presenza di ostacoli fisici (alberi, edifici alti, etc.) che ostacolano la ricezione dei segnali emessi dai satelliti.

L'elevata precisione intrinseca (Brasington, 2000) e l'omogeneità della accuratezza dei dati di posizione che si possono ottenere con il metodo in questione determina una diffusione sempre maggiore dell'impiego del sistema GPS. Le già

Ricevitori GPS doppia frequenza (*reference a sinistra e rover a destra*)

Figura 5

elevate caratteristiche di produttività vengono ulteriormente incrementate dai metodi "RTK" (*Real Time Kinematic*) che prevedono un collegamento (via radio, telefono o internet) tra i 2 ricevitori e consentono la determinazione di posizione e la quantificazione della sua precisione in tempi anche inferiori a quelli necessari al rilievo topografico eseguito con stazioni motorizzate.

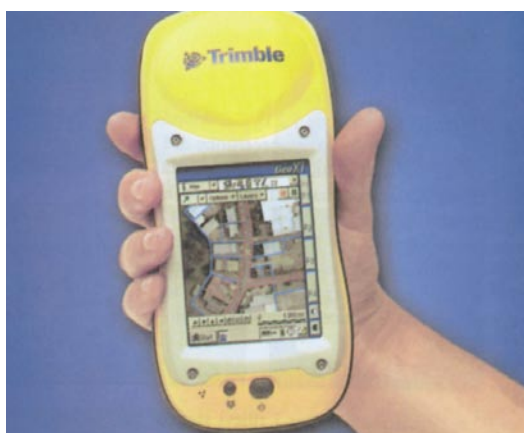
Rispetto al rilievo topografico classico, si hanno i vantaggi della indipendenza dalla intervisibilità tra il punto di rilievo e la stazione di riferimento e l'incremento della distanza da quest'ultima; anche l'elaborazione dei dati avviene in modo relativamente semplice e non si corre il rischio di errori sistematici dovuti a problemi nelle fasi del rilievo di inquadramento. Come limite restano i problemi dovuti al cambio di DATUM cartografico e del riferimento altimetrico. La precisione può essere quantificata nell'ordine del centimetro per il posizionamento planimetrico ed altimetrico.

La operatività del rilievo può essere del tutto simile a quella dell'operatore che movimentata la stazione riflettente in un metodo topografico classico. Il rilievo, oltre in modalità "RTK" può essere fatto in cinematico-postelaborazione, permettendo, grazie ad una acquisizione veloce e continua dei dati, di rilevare l'arenile anche con modalità differenti rispetto alle classiche sezioni parallele. Nel caso del rilievo della linea di riva si può ricorrere a una movimentazione con veicolo attrezzato (moto da spiaggia). Inoltre la modalità "RTK" permette all'operatore di percorrere in tempo reale la linea di riva direttamente sulla quota zero, consentendo così di effettuare il rilievo senza successive interpolazioni.

Per il rilievo della linea di riva e per quegli scopi che consentono di acquisire dati con precisioni decimetriche (GCP per immagini da satellite, GIS) si possono anche impiegare i ricevitori con solo codice (Fig. 6), molto meno costosi e più maneggevoli di quelli "geodetici" che registrano anche i dati relativi alle misure di "fase".

Per il progetto Beachmed, sono stati effettuati diversi rilievi con tecnologia GPS. Uno degli scopi di questi rilievi è stato quello di essere utilizzati come confronto a rilievi effettuati con altre tecnologie utilizzando inoltre lo stesso sistema di riferimento.

Nell'area delle scogliere del Gombo sono stati effettuati rilievi con sezioni equidistanti 5 m in modalità "RTK" per il confronto con l'aerofotogrammetria e con il Lidar aereo e terrestre. La



Ricevitore GPS per misure di codice (Geo XT)

Figura 6

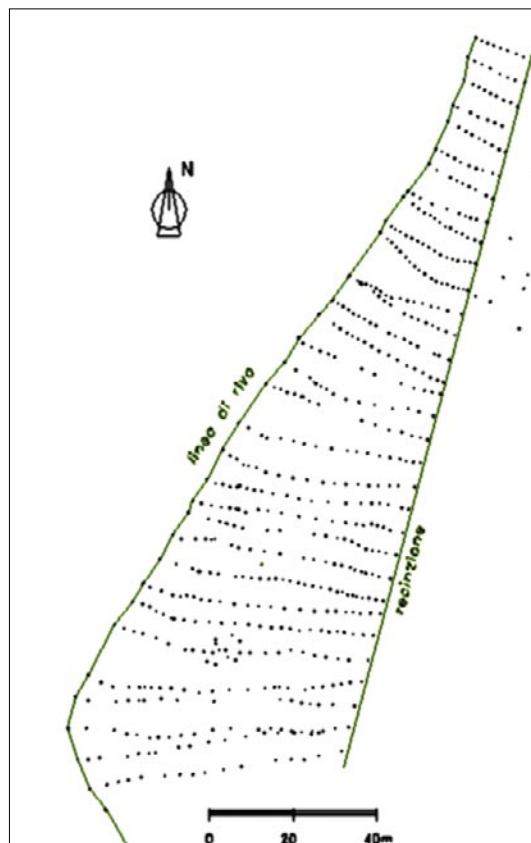


Figura 7 Punti GPS rilevati al Gombo

strumentazione utilizzata è una coppia di ricevitori Leica System 530 (Fig. 5). Si sono eseguite circa 30 sezioni (Fig. 7) a partire da un allineamento materializzato con 2 paline lungo il quale si sono stabiliti intervalli regolari dirigendosi verso la linea di riva. I punti sono stati acquisiti in modalità "RTK" con un tempo medio di stazionamento di circa 5 secondi per un totale di circa 600 punti; l'area rilevata è risultata avere una estensione di circa 5950 m². La stazione "reference" è stata ubicata in prossimità dell'area in oggetto e ricavata tramite una sessione statica di 40 minuti dal punto IGM95 situato all'interno della Tenuta di San Rossore.

Il datum di elaborazione usato è il WGS84; è stata realizzata anche una trasformazione a UTM32-ED50 e quote ortometriche (con il software Verto2 dell'I.G.M.).

L'intervallo medio tra i punti consecutivi lungo le sezioni è di circa 2 metri e la precisione delle determinazioni in quota si può stimare nell'ordine di $\pm 2-3$ cm (considerando anche il differente affondamento della palina nelle diverse zone di spiaggia rilevate).

Applicando le formule riportate nei precedenti paragrafi con i valori sopra riportati, la precisione assoluta del volume di spiaggia emersa determinato mediante il rilievo GPS può essere stimata in ± 60 m³ ai quali si deve aggiungere un eventuale

ulteriore apporto circa equivalente se si considera un errore sistematico dovuto alla stima della quota assoluta del rilievo basata su misure di altezza strumentale. Nei raffronti tesi a determinare la precisione delle altre metodologie di rilievo poste in essere nell'area del Gombo, si considererà il rilievo GPS esente dall'errore sistematico sulla quota in modo da schematizzare la situazione relativa con maggiore efficacia. L'eventuale errore sistematico nella determinazione delle quote rilevate sarà quindi considerato come una costante da determinare, assieme a quello analogo delle metodiche di volta in volta considerate, nelle differenze di quota assoluta tra i rilievi. Avendo deciso di adottare il datum WGS84 e le quote ellissoidiche come riferimento di tutte le misure basate su rilevamenti assistiti da GPS (LIDAR e scanner terrestre), si è analizzata la linea di riva battuta e si è posta la quota (ellissoidica) di riferimento per il calcolo dei volumi della spiaggia emersa con valore pari a 46.45 metri, corrispondente, nell'area considerata, al valore minimo rilevato in modo da non "scartare" informazioni. La trasformazione operata col software Verto2 ha dato luogo a una quota ortometrica leggermente negativa (-0.13 metri). Infatti la differenza tra H e Q, verificata costante sui punti estremi dell'area rilevata, è stata quantificata in 46.58 metri.

Il volume di spiaggia (che sarà adottato come valore di riferimento nei raffronti con i rilievi LIDAR) è stato calcolato mediante elaborazione dei dati del rilievo GPS con il software Surfer8. È creata una griglia (DTM) di lato 1 m adottando un criterio di triangolazione basata su interpolazione lineare. Il programma determina così il volume, che è risultato pari a 7109 m³ per una altezza media (relativa alla quota di riferimento) di 1.218 m riferita a un'area di indagine leggermente inferiore a quella effettiva del rilievo per effetto di una regolarizzazione dei confini e risultata pari a 5838 m².

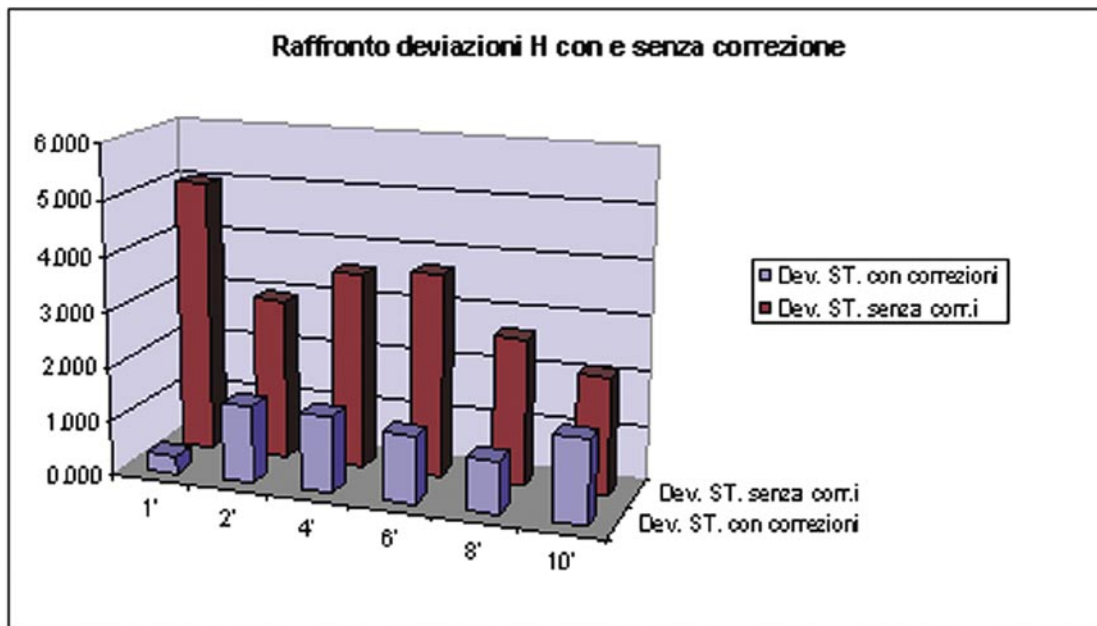
Il punto noto descritto in precedenza è parte di una rete di inquadramento predisposta all'interno della Tenuta con punti rilevati in modalità statica sempre nell'ambito di questo progetto.

Ulteriori rilievi con tecnologia GPS sono stati effettuati in alcuni siti campione su tutta la costa della Toscana per il confronto delle linee di riva con le immagini da satellite.

Nella Tenuta di San Rossore è stato anche effettuato un monitoraggio mensile della linea di riva durante tutto il 2004 per verificare la sua variabilità stagionale.

Sono stati fatti inoltre confronti fra varie modalità di rilievo come: cinematico, "RTK", DGPS sia per quanto riguarda le precisioni che le geometrie di rilievo e i tempi di inizializzazione anche al variare della stazione di riferimento.

Sono state effettuate prove di verifica dell'atten-



Istogramma dei risultati ottenuti nelle determinazioni di posizione (altimetrica): la prima colonna a sinistra si riferisce al modello GeoXT

Figura 8

dibilità metrica dei ricevitori palmari Trimble GeoXT e Geoexplorer3 di Trimble con e senza la correzione apportata in fase di post-elaborazione. Sono state effettuate acquisizioni con tempi di stazionamento diversi (1' con Geo XT, 2', 4', 6', 8' e 10' con Geoexplorer3; Fig. 8).

Come si vede dalla figura, nonostante una certa variabilità a seconda del modello di ricevitore impiegato, la precisione conseguite, in accordo con quanto emerso dallo studio della letteratura scientifica in materia, risultano sub-metrica in planimetria e di poco inferiore in altimetria.

Sono state eseguite anche prove di verifica della correzione differenziale planimetrica utilizzando un ricevitore DGPS Max della CSI Wireless. Per i diversi tipi di correzione, l'errore medio nella determinazione planimetrica dei punti è risultato:

- Omnistar: 1.03 metri;
- Beacon: 1.27 metri;
- Egnos: 1.84 metri.

In questo caso si tratta di correzioni in tempo reale fornite da satelliti geostazionari o da radiofari (Beacon). Questo tipo di ricevitori viene usato nei rilievi batimetrici: per la determinazione planimetrica del punto.

Rilievi GPS sono stati utilizzati anche per la predisposizione di *marker* a terra per aerofotogrammetria o dei GCP per la georeferenziazione di immagini da satellite e per la verifica di video sistemi installati nella zona del Gombo e di Alassio.

Rilievo aerofotogrammetrico

Il rilevamento fotogrammetrico stereoscopico è basato sulla restituzione di coppie di prese, solitamente con asse nadirale ed eseguite da un aereo. La zona comune a 2 fotogrammi viene analizzata con apposite apparecchiature (restitutori fotogrammetrici) che, attraverso le tre fasi di orientamento del rilievo (interno, relativo e assoluto), consentono la determinazione di posizione dei punti visibili. Per poter effettuare la restituzione di un rilevamento aerofotogrammetrico le prese devono quindi essere organizzate in "strisciate" lungo le quali i fotogrammi si sovrappongono l'uno all'altro oltre il 50% (solitamente al 60%).

Ultimamente è sempre più diffuso l'uso di camere metriche digitali. La fotogrammetria digitale ha forti analogie con il metodo analitico, in quanto utilizza il medesimo schema concettuale e spesso anche gli stessi algoritmi di calcolo e di compensazione. La principale differenza consiste nel materiale di partenza, cioè nell'impiego di immagini digitali ottenute per captazione diretta (camere digitali) o per scansione di immagini fotografiche. Nel caso si proceda alla captazione diretta delle immagini mediante camere metriche digitali ad alta risoluzione, si hanno risultati di buon livello qualitativo, paragonabili a quelli della fotogrammetria analitica. In prima approssimazione si può prevedere, per le attrezzature di presa digitali metriche e per le scansioni "rigorose" dei fotogrammi analogici eseguiti con camere metriche, uno scarto quadratico medio sui risultati di posizione dei punti rilevati, pari a 1-3 pixel riportati

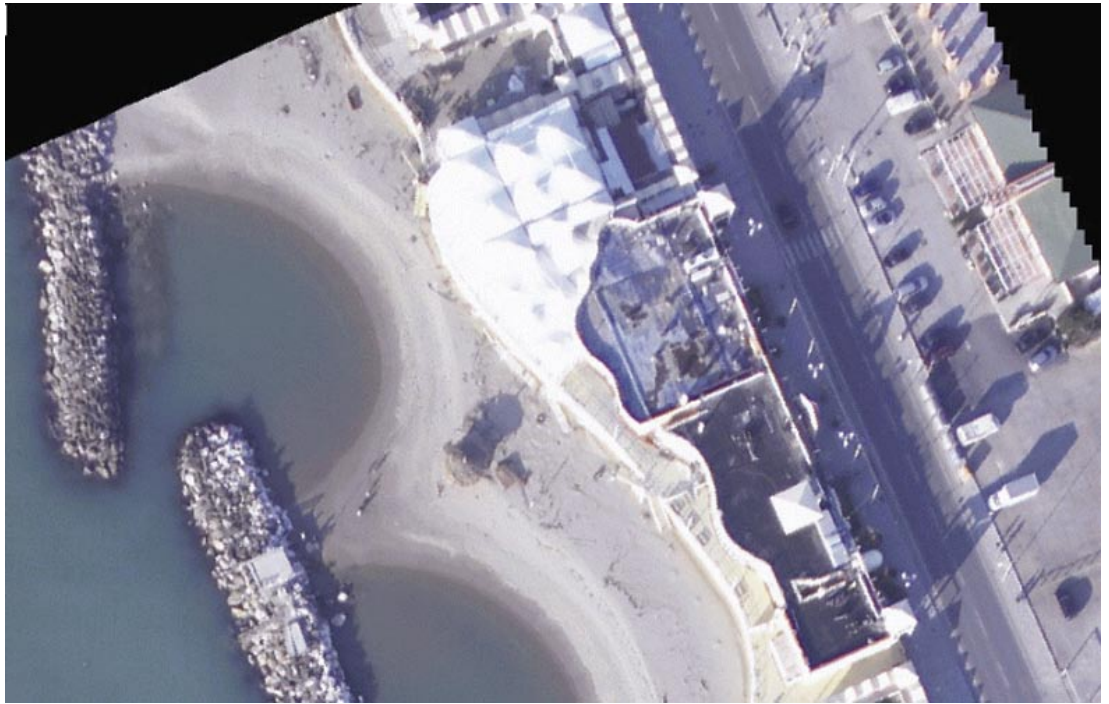


Figura 9

Particolare ingrandito di una ortoimmagine digitale acquisita sulla spiaggia di Tirrenia (PI)

al terreno. Per esempio, se il fotogramma ha una risoluzione tale che 1 pixel equivale a un quadrato di 8x8 cm sul terreno, la precisione del rilievo varierà tra 8 e 24 cm.

I problemi per il rilievo fotogrammetrico delle spiagge nascono dalla difficoltà nella determinazione dei punti omologhi sui 2 fotogrammi in assenza di particolari morfologici riconoscibili sul terreno. Infatti la sabbia, soprattutto se livellata meccanicamente, non presenta punti facilmente distinguibili uno dall'altro, per cui la visione stereoscopica risulta difficile e quindi poco precisa; si può quindi indicativamente pensare ad errori circa doppi di quelli che si ottengono su terreni con tessitura univoca (Casella, 2002).

Un altro problema si pone per la segnalizzazione e determinazione dei punti di appoggio necessari al riferimento cartografico del rilievo: in assenza di punti facilmente identificabili sul terreno, soprattutto in prossimità della linea di riva, sarà necessario "attrezzare" preventivamente le prese con segnali artificiali di dimensioni adeguate i cui centri possono essere determinati con metodi topografici o mediante rilievo satellitare GPS.

Infine, resta da notare il problema economico conseguente alla forma fortemente allungata della zona di interesse: nei rilievi per cartografia a media scala la copertura dei fotogrammi eccede di molto l'ampiezza della spiaggia e ne deriva un certo "spreco" di risorse, in quanto viene elaborata solo una porzione assai limitata del territorio rappresentato. La conseguenza è un elevato costo di acquisizione e di elaborazione per unità di su-

perficie interessata dal monitoraggio.

La diffusione sempre crescente di apparecchiature fotografiche digitali, dotate anche di risoluzione elevata, ma di basso costo relativo, fa propendere gli operatori al loro impiego nel rilievo fotogrammetrico, soprattutto per riprese che riguardano zone pianeggianti, quali appunto le spiagge (Fig. 9). Nei rilievi con metodiche fotogrammetriche non rigorose possono essere utilizzate attrezzature di presa dotate di proprietà metriche ridotte (cosiddette semi-metriche) e apparecchi di metricità non determinata (camere amatoriali, telecamere, scansioni di immagini parziali, ecc.).

L'errore nella determinazione della posizione dei punti restituiti da prese digitali semi-metriche può variare tra 3 e 10 pixel riportati al terreno. L'errore planimetrico, soprattutto su terreni pianeggianti, è di solito inferiore rispetto a quello inerente determinazioni di quota, che più risente degli effetti distorsivi dell'immagine.

In letteratura si hanno numerosi riferimenti a esperienze di immagini semi-metriche captate da aeromobile, tese a validare il sistema mediante raffronti con metodi già consolidati (Brasington, 2000; Baily, 2002; Judge, 2001) e si riportano precisioni variabili dai 20 agli 80 cm in quota; generalmente viene confermata una precisione migliore per le determinazioni planimetriche. Altri autori (Hancock, 2001) riportano l'impiego delle stesse attrezzature fotografiche per rilievi *close-range* (su modelli), mentre un orientamento critico abbastanza interessante emerge dal contributo di (Henry, 2002) che raffronta le varie metodologie di ripresa di foto aeree (con velivolo attrezzato per prese metriche, con elicottero, con ultraleggeri o con piccoli aerei radioguidati),

variando le altezze di volo e le camere da presa; tuttavia le precisioni ottenute non vengono quantificate e si rimanda ad esperienze dirette che, di caso in caso, consentono una verifica delle scelte di progetto, in armonia con quanto già riportato in questo paragrafo.

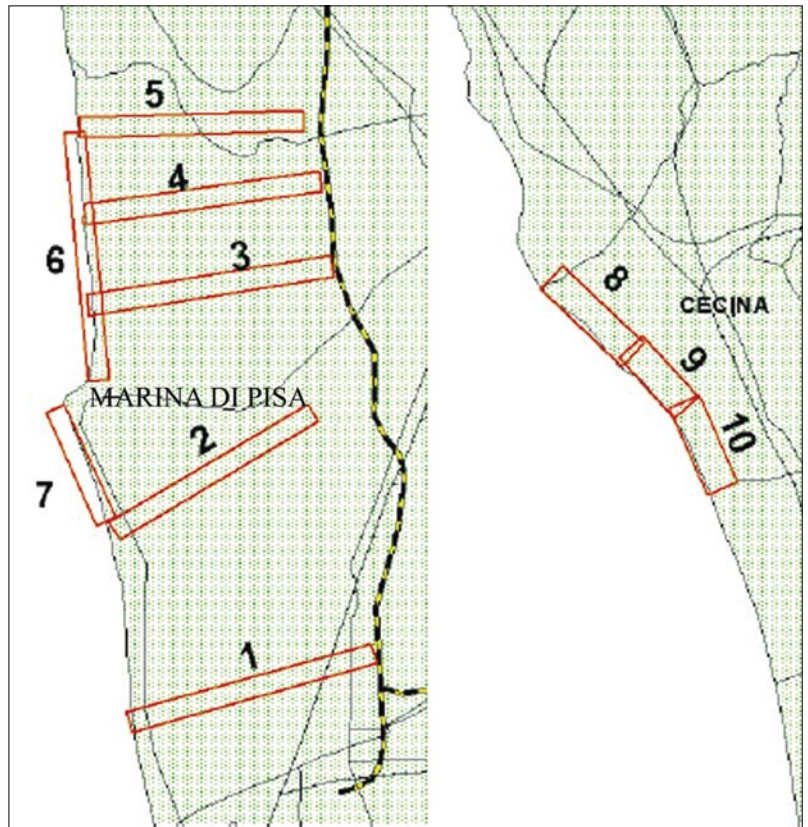
Per quanto riguarda le camere amatoriali non metriche, si raccomanda un uso per il solo rilievo planimetrico (es. linea di riva) utilizzando un maggior numero di punti di controllo a terra (GCP) ed evitando le determinazioni in quota che, come abbiamo visto, sono più sensibili ai fenomeni distortivi.

Per il progetto Beachmed sono stati eseguiti due voli con camere digitali semi-metriche. Il primo è avvenuto il giorno 22/01/2004 con un aereo Partenavia P68 equipaggiato anche con sensori CASI (iperspettrale) ed ALTM (LIDAR) secondo un preciso piano di volo (Fig. 10) il secondo sulla spiaggia del Gombo, con aeromobile leggero CESNA 172 dal quale sono state effettuate riprese con una camera digitale Nikon D100 ed obiettivi calibrati di focale 24 mm 50 mm.

La ripresa è stata effettuata con camera digitale 4000x4000 pixel con risoluzione geometrica 20x20 cm. Sono state prodotte ortofoto digitali a colori con risoluzione 20x20 cm (Fig. 9).

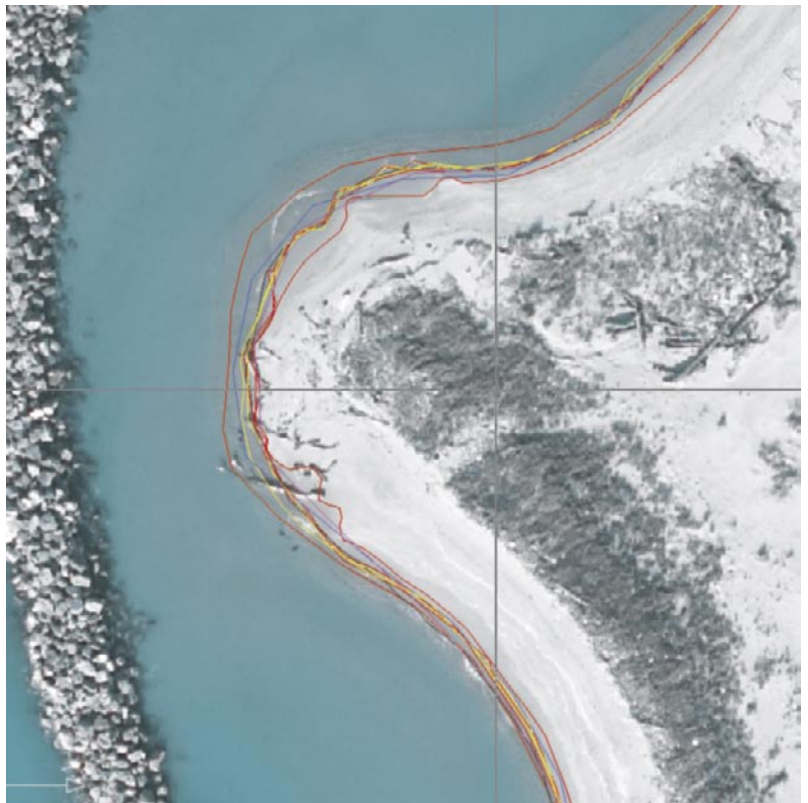
Questo tipo di immagini, una volta georeferenziate, può essere anche un utile strumento per il tracciamento della linea di riva. Uno dei principali problemi nella digitalizzazione della linea di riva da immagini è il suo corretto riconoscimento da parte degli operatori. In Figura 11 è riportato un esempio di tracciamento da parte di alcuni operatori, confrontato con la linea di riva rilevata con GPS (linea blu). Si nota come esistano notevoli differenze di interpretazione che possono portare ad errori di diversi metri.

Le foto riprese con la camera digitale Nikon D100 sono state restituite con il software STEREOVIEW della Menci Software. I risultati sui quali è avvenuta la valutazione della metodologia sono quelli relativi alla restituzione stereofotogrammetrica di una porzione di litorale di circa 120 metri di estensione. In particolare sono stati utilizzati due fotogrammi consecutivi di una strisciata eseguita con una quota di 1000 ft equivalenti ad una scala analogica di 1/200. I risultati, che saranno oggetto di una più approfondita analisi, già da questa prima elaborazione mostrano come la metodologia utilizzata possa fornire un contributo attivo nella descrizione e, soprattutto, nella quantificazione dei fenomeni costieri.



Piano di volo delle riprese effettuate il 22/01/2004 sulla costa pisana e su quella di Cecina Mare

Figura 10



Confronto fra le linee di riva digitalizzate da diversi operatori su di una ortofoto digitale e quella rilevata con GPS (in blu) sulla spiaggia del Gombo

Figura 11



Figura 12

Immagine digitale ripresa con camera Nikon D100 da aeromobile leggero CESNA 172 sull'area campione della spiaggia del Gombo. Si possono vedere i marker (bianco-neri) utilizzati

Laserscan

Lo scanner terrestre (Fig. 13) nasce dall'abbinamento di un distanziometro laser a impulsi con uno strumento topografico (goniometro) motorizzato e dà la possibilità di determinare la posizione spaziale di una serie di punti equidistanziati in azimut ed elevazione.

Si ha così la generazione di una cosiddetta "immagine solida" o "modello". L'immagine viene captata da un sensore rotante (scanner) che rileva il colore (o il tono di grigio) del "punto" considerato e la sua posizione spaziale relativa al "centro" dello strumento, solitamente espressa con



Figura 13

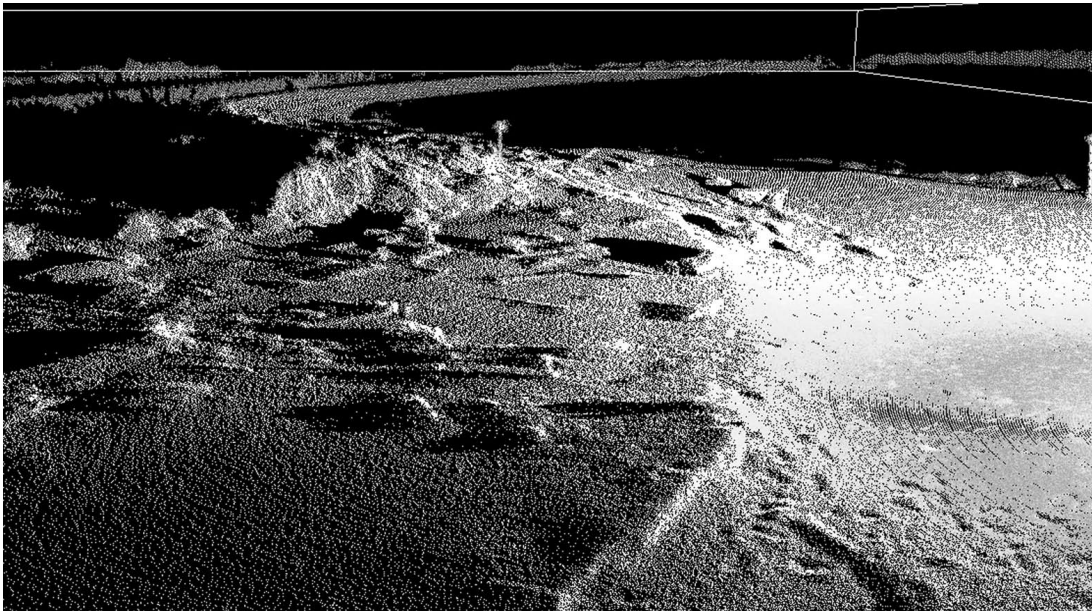
Scanner terrestre utilizzato nel rilievo dell'area del Gombo

una terna di numeri corrispondenti alle coordinate cartesiane. Ciascun pixel che compone l'immagine è cioè associato a una posizione nello spazio per cui, con opportuni programmi, è possibile visualizzare l'assetto tridimensionale del terreno rilevato.

La analogia tra gli scanner terrestri e gli strumenti topografici motorizzati (Stazione Totale) è molto stretta: infatti la principale e quasi unica differenza consiste nella eliminazione del cannocchiale e nella sua sostituzione con un "raggio" laser capace di effettuare le misure di riflettanza e di distanza (talvolta anche colorimetriche) in frazioni di secondo (la frequenza di acquisizione va da 1 a 100 KHz circa); questi dati vengono associati ai valori angolari di direzione azimutale e zenitale e registrati nella memoria dello strumento in tempi decisamente contenuti. Ne consegue la possibilità di ottenere in pochi minuti quantità rilevanti di dati (milioni di punti). La precisione di misura, negli strumenti più recenti, è simile a quella degli strumenti topografici, quindi nell'ordine del centimetro, mentre la portata utile può variare da qualche decina a qualche centinaio di metri a seconda dei modelli.

La relativa facilità di esecuzione delle misure e la grande quantità di informazioni che si possono acquisire in tempi decisamente più brevi di quelli necessari al rilievo topografico classico forniscono una indicazione positiva per l'impiego di questo metodo nel rilievo di scogliere o di opere morfologicamente complesse, che possono essere descritte cioè solo con una elevata densità di punti per unità di superficie.

Per il progetto Beachmed in data 23/01/2004 è



stato eseguito un rilievo in prossimità delle scogliere del Gombo con strumentazione Laser scanner Riegl (Fig. 14). Anche questo rilievo è stato georiferito in coordinate WGS84 UTM 32. Per ottenere questo la posizione dei riflettori, montati su paline, e riconoscibili nella scansione, è stata poi rilevata sostituendovi le antenne del GPS.

Come si è accennato, e come si vede dalle immagini del presente paragrafo, si è sperimentata questa tecnica di rilevamento nell'area di prova già citata, realizzando un modello ancorato 6 punti materializzati con prismi riflettenti e determinati via GPS, intercambiando il target con l'antenna

Esempio di immagine solida da scansione terrestre (area del Gombo). Si noti in lontananza la presenza delle scogliere parallele

Figura 14

della stazione ricevente mobile (*rover*) sulla testa di una serie di paline infisse nella sabbia dell'arenile (Fig. 15).

Si è così realizzata la possibilità di georiferire tutti i punti captati al sistema di riferimento prescelto (UTM32-WGS84 con altezze ellissoidiche). In Figura 16 si vede in pianta l'immagine solida di Figura 14 dopo l'ortorettificazione. Ciascuno dei punti bianchi che compongono l'immagine



Materializzazione e determinazione dei punti di appoggio del modello con riflettore laser (a sinistra) e con antenna GPS (a destra)

Figura 15

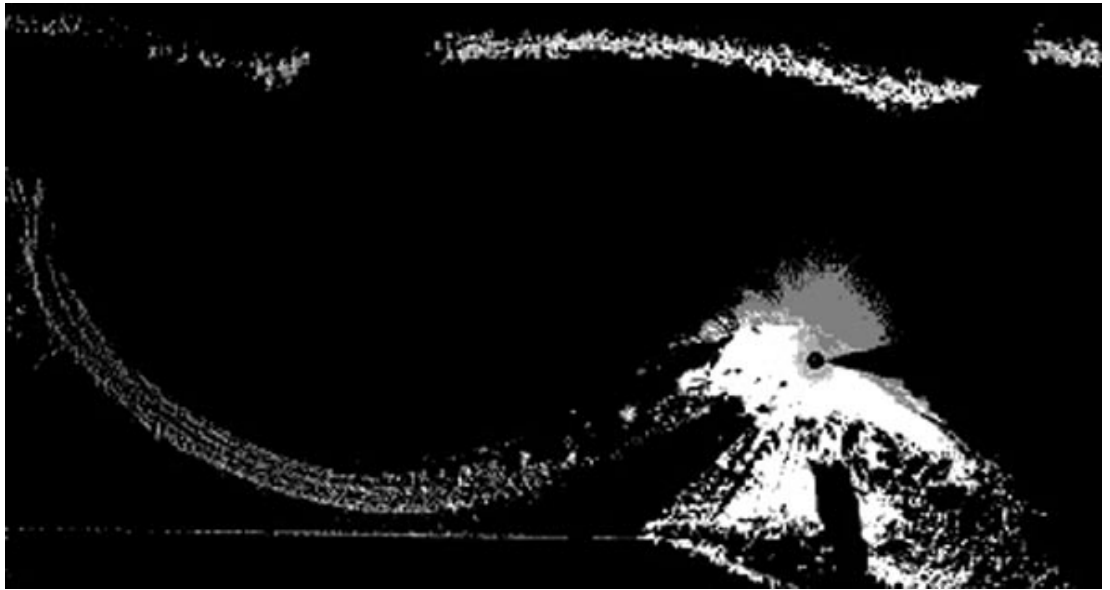


Figura 16

Vista in pianta dell'immagine solida captata con lo scanner terrestre sulla spiaggia del Gombo

rappresenta una determinazione di posizione. Si noti l'effetto del diradamento all'incremento della distanza dal punto di scansione e la presenza di zone d'ombra dietro a ciascun elemento prominente sul territorio. Di particolare importanza è l'accuratezza nella rappresentazione delle scogliere parallele.

Il numero complessivo dei punti rilevati è risultato di oltre 2.300.000, si è quindi reso necessario un trattamento dati automatico per ottenere un insieme di informazioni più omogeneo, soprattutto per quanto riguarda la zona della spiaggia prescelta per le verifiche.

Un primo "taglio" è stato effettuato per analizzare la zona di sovrapposizione con il rilievo GPS (Fig. 17) all'interno della quale ricadevano circa

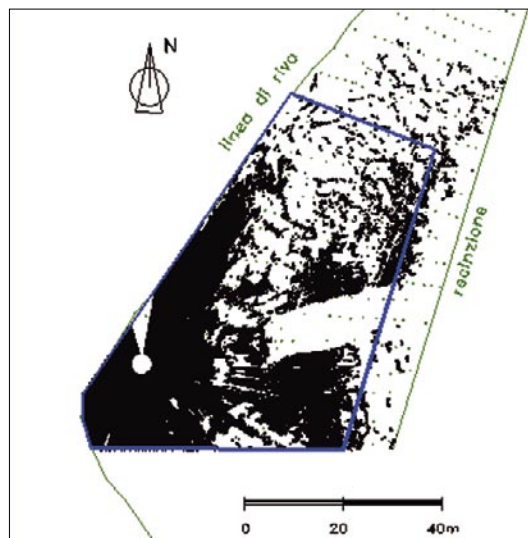


Figura 17

Area di sovrapposizione del rilievo per scansione con laser terrestre (punti neri) con quello GPS RTK (punti verdi) sulla spiaggia del Gombo

630.000 punti rilevati. In questa fase, ridurre il numero di dati da trattare, si è anche cercato di eliminare i punti troppo vicini tra loro nella sequenza di registrazione, imponendo al programma di "saltare" i punti posti a distanza inferiore a 2 cm dal punto precedente.

Dato che lo scanner procede per "profili" successivi, cioè registrando i dati relativi a una serie di punti aventi tutti lo stesso angolo azimutale (il raggio laser ruota in senso zenitale fra 2 valori prestabiliti partendo dall'alto verso il basso), questo primo "soltimento" non è molto efficace e riguarda solamente la zona del rilievo più vicina alla postazione dello strumento (dai 4-5 m fino al limite inferiore di ripresa che è di circa 2.3 m).

In analogia a quanto sperimentato sulla precedente sperimentazione effettuata a Massa (Aminti e Aminti, 2002) si è resa necessaria una seconda elaborazione dei dati, tesa a individuare e rimuovere gli "ostacoli" presenti sulla spiaggia (soprattutto costituiti da vegetazione e da ostacoli di vario genere, come tronchi, detriti, ecc. come si vede in Figura 18).

Questo passaggio di calcolo analizza i singoli "profili" rilevati (le colonne nella matrice dell'immagine solida di Figura 19) eliminando i punti relativamente "alti", tali cioè da generare pendenze negative maggiori, in valore assoluto, di un valore prefissato, con i punti successivi. Questa analisi ha evidenziato diversi punti "critici" (quasi 36.500). Circa la verifica della utilità di questo tipo di trattamento dei dati riferiremo più avanti.

Si sono infine trovati altri *outliers*, dovuti con tutta probabilità a una riflessione accidentale di un oggetto in movimento nei pressi dello scanner. Come si vede in Figura 20, la distanza dell'ele-



Parte della spiaggia oggetto del rilievo. Si notano gli ostacoli dispersi sull'arenile e i punti di appoggio materializzati con i riflettori montati su paline

Figura 18

mento di disturbo è molto inferiore al range minimo previsto e la quota relativa è vistosamente errata (oltre 1.70 m).

Si è resa infine necessaria una ulteriore omogeneizzazione della densità dei punti rilevati, consistente in un diradamento di quelli troppo vicini tra loro e ubicati nella zona della scansione più vicina alla postazione dello strumento. Volendo procedere alla interpolazione di un DTM con lato 1 metro, si è stabilito di eliminare i punti che risultavano più vicini di 0.1 m da quelli precedentemente registrati. In questo modo il numero dei punti impiegati per le elaborazioni successive e collocati nell'area indicata in Figura 17 è stato portato a circa 75.000.

La elaborazione del DEM è stata effettuata quindi agevolmente utilizzando un metodo per triangolazione basato su interpolazione lineare.

Nei paragrafi successivi daremo conto delle operazioni di raffronto delle misure di scansione terrestre con le altre metodologie di rilievo messe in atto nella zona del Gombo, cioè con la scansione da piattaforma aerea e, qui di seguito, con il rilievo GPS RTK.

Applicando le formule per il calcolo dei volumi di spiaggia riportate in precedenza con i seguenti valori:

- lato della maglia 1.00 m;

- superficie 2940 m²;
- precisione delle determinazioni in quota dei nodi ± 0.05 m,
- scarto sistematico nella determinazione della quota assoluta tra 2 rilievi consecutivi ± 2 cm.

La precisione assoluta del volume di spiaggia emersa determinato mediante il rilievo per scansione laser terrestre può essere stimata in ± 62 m³, corrispondente a una incertezza nella altezza media del solido considerato di circa 21 mm.

Per quanto riguarda il confronto fra il rilievo effettuato con la scansione laser e quello con il GPS, si sono effettuati 2 tipi di raffronto: uno puntuale, basato sulla verifica delle quote ottenute con lo scanner nei punti significativamente vicini a quelli rilevati con il GPS, e uno "globale" teso a verificare la differenza tra i volumi di spiaggia calcolati con i due metodi.

Un programma appositamente predisposto ha letto i dati GPS (coordinate dei punti) e quelli pre-trattati dallo scanner. Quando la distanza tra i punti della scansione risultava inferiore a un valore prefissato (0.25 m), il dato era memorizzato per il raffronto di altezza; alla fine tutti i punti scanditi che ricadevano all'interno del raggio prefissato attorno a un punto GPS sono stati mediati tra loro (utilizzando l'inverso della distanza come peso) in modo da fornire il valore sul quale operare la

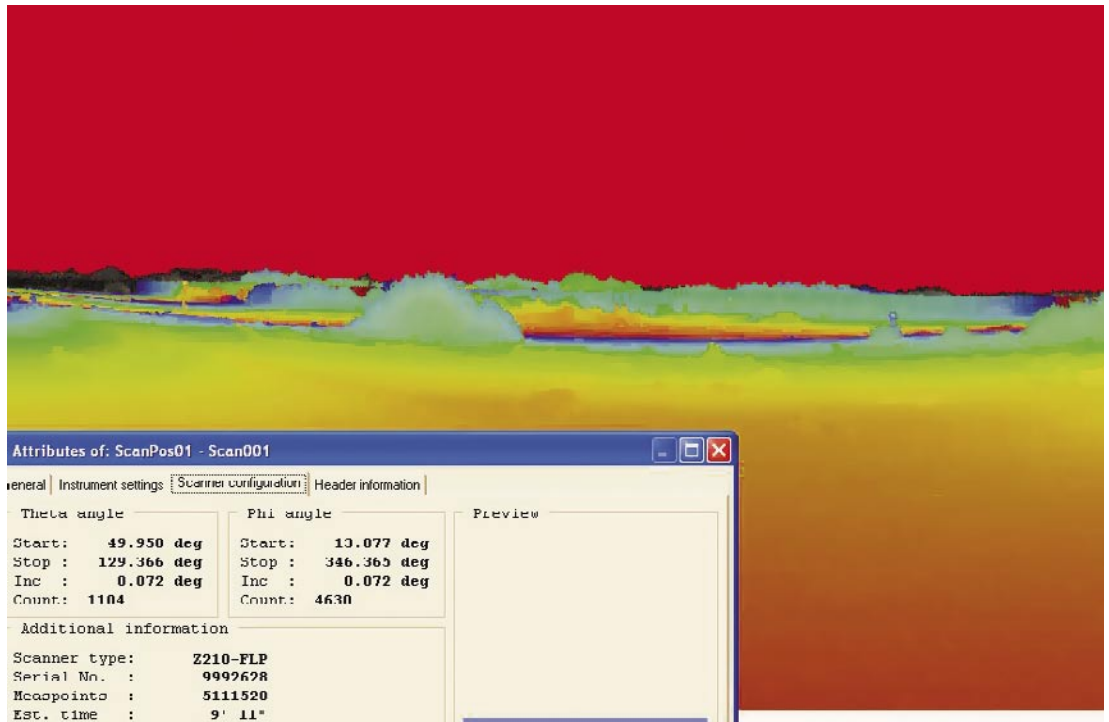


Figura 19

Immagine in falso colore (tinte proporzionali alla distanza dell'oggetto raffigurato dallo strumento). È evidenziata la presenza di vegetazione e di ostacoli. In primo piano si vede il report interno dello scanner con riportati i numeri di righe (1104) e di colonne (4630) che compongono l'immagine. In basso si noti il tempo previsto di acquisizione (9'11")

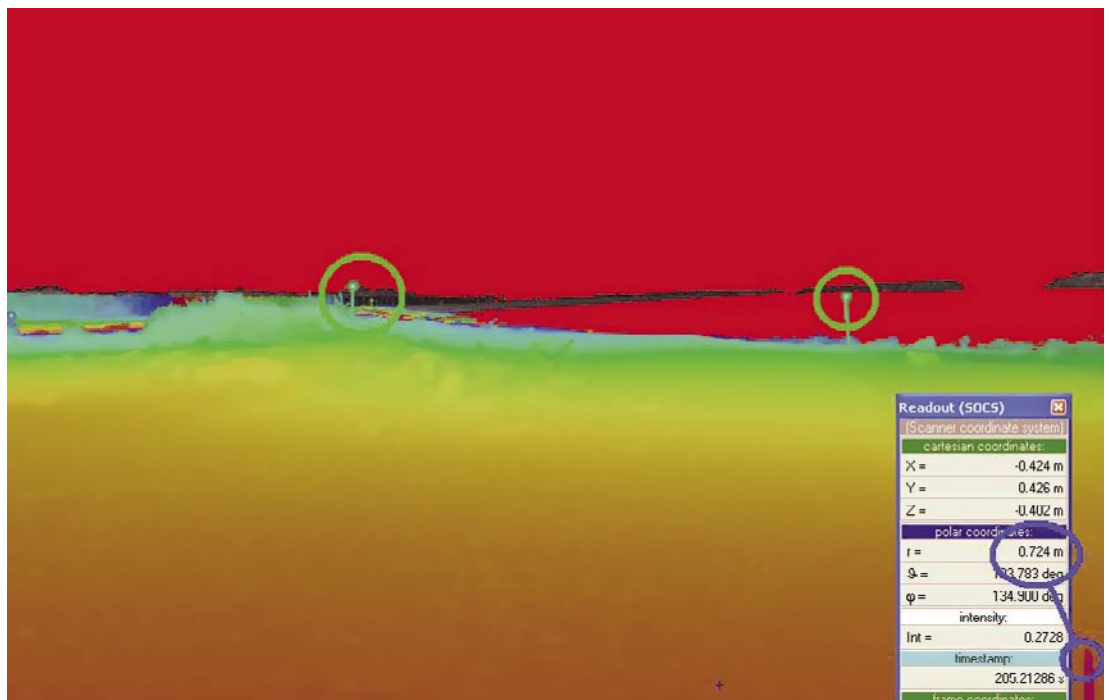


Figura 20

Immagine in falso colore (tinte proporzionali alla distanza dell'oggetto raffigurato dallo strumento) su cui è evidenziata la presenza di outliers (in basso a destra) comprovati dalla indicazione della distanza di misura (0.725 m) evidentemente inferiore ai 2.3 m previsti sulla base della inclinazione del raggio (34.9 deg in depressione)

Analisi delle differenze "puntuali" tra misure scanner e GPS dopo la post-elaborazione

Post elaborazione completa	Con outliers	Senza outliers
<i>N. outliers</i>	16	
<i>Valore minimo differenze</i>	-0.15 m	
<i>Valore massimo differenze</i>	1.83 m	
<i>Media delle differenze</i>	0.06 m	0.00 m
<i>s.q.m.</i>	0.22 m	0.05 m

differenza; le coordinate planimetriche registrate nel file delle differenze sono evidentemente quelle del punto GPS.

Il file delle differenze è risultato composto da 147 punti, sui 246 punti GPS che ricadevano nella zona di 17. Quindi ben 99 punti GPS sono risultati "isolati", cioè distanti da tutti i punti della "nuvola" di oltre 75000 posizioni selezionate dallo scanner. La causa di questo effetto, a prima vista sorprendente, è da attribuire principalmente alle numerose zone "d'ombra" causate dagli ostacoli ma anche dal "diradamento" dei punti scanditi all'aumentare della distanza dallo strumento.

Una prima analisi ha messo in evidenza una differenza di tipo sistematico che è stata quantificata, in prima approssimazione, a +0.10 m tra i punti scanditi e quelli rilevati con il GPS. Tale differenza può essere imputata agli errori commessi nel computo delle diverse altezze dei punti di appoggio (riflettori montati su paline e scambiati con l'antenna GPS) e anche delle altezze strumentali. Si è quindi provveduto a traslare rigidamente di 10 centimetri verso il basso la superficie definita dai punti dello scanner prima di effettuare il confronto. Come vedremo questa operazione preliminare, sia pure approssimata, ha dato risultati positivi.

L'analisi statistica delle differenze, riportata in Tabella 1, indica una buona concordanza con le previsioni: il valore minimo delle differenze è di -0.15 m, quello massimo di 1.83 m, e la differenza media è di 0.06 m con un numero di *outliers* (differenze in valore assoluto maggiori di 0.15m), tutti positivi, limitato a 16 e uno s.q.m. di 0.22 m. Togliendo gli *outliers*, la media delle differenze scende al di sotto del mezzo centimetro e lo s.q.m. arriva a 0.05 m come prevedibile su una superficie abbastanza "scabra".

Senza la fase seconda della pre-elaborazione, quella cioè che tenta di eliminare gli *outliers* analizzando ogni singolo raggio, i risultati dell'analisi delle differenze non sono apparentemente

Analisi delle differenze "puntuali" tra misure scanner e GPS dopo post-elaborazione senza la seconda fase di pre-elaborazione

Post elaborazione parziale	Con outliers	Senza outliers
<i>N. outliers</i>	23	
<i>Valore minimo differenze</i>	-0.19 m	
<i>Valore massimo differenze</i>	1.65 m	
<i>Media delle differenze</i>	0.08 m	0.01 m
<i>s.q.m.</i>	0.26 m	0.05 m

Tabelle 1 (sx) e 2 (dx)

Analisi delle differenze "globali" tra misure scanner e GPS dopo post-elaborazione

	GPS-RTK	Post-elab totale	Post-elab parziale
<i>Volume</i>	3359 m ³	3575 m ³	3960 m ³
<i>Superficie</i>	2940 m ²	2940 m ²	2940 m ²
<i>Hmedia</i>	1.142 m	1.216 m	1.347 m
ΔV		216 m ³	601 m ³
$\Delta Hmedia$		0.074 m	0.205 m

Tabella 3

molto diversi, come si vede in Tabella 2.

L'analisi globale dei volumi che si vengono a determinare e delle differenze relative evidenzia invece una situazione significativamente diversa, come si vede in Tabella 3.

Siccome il volume è stato calcolato, come già detto in precedenza, mediante la elaborazione di una griglia a passo regolare (1 metro) interpolata linearmente, ma senza eliminare gli *outliers* identificati nell'analisi di cui alle Tabelle 1 e 2, risulta evidente che i migliori risultati di colonna 2 rispetto a quelli di colonna 3 rivelano una diminuzione sensibile della influenza negativa degli *outliers* di segno positivo, di quelli cioè che incrementano il volume calcolato.

Allo stesso tempo, si può affermare con sicurezza che, se si eliminassero gli *outliers* positivi evidenziati con il raffronto tra la scansione e il rilievi GPS, si arriverebbe a un "abbassamento medio" della superficie della scansione pari a circa 6 cm (vedasi la variazione nella penultima riga della citata Tabella 2), con una evidente diminuzione

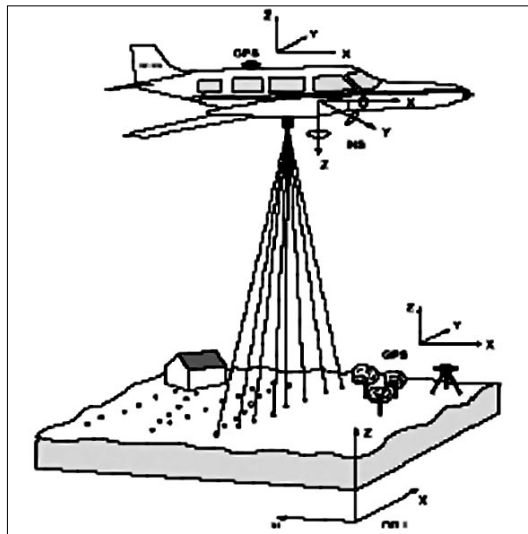


Figura 21

Principio di funzionamento di un sistema LIDAR

delle differenze di volume e, conseguentemente, di altezza media di una quantità tale da rendere quest'ultima inferiore ai 21 millimetri previsti nel paragrafo precedente.

In questa sede non è possibile procedere ulteriormente nella analisi dei metodi più efficaci per la individuazione/rimozione degli *outliers*, che dipendono oltretutto da fattori specifici di ogni rilievo, quali la presenza (o meno) di vegetazione, dalla conformazione dell'arenile, dalla presenza di ingombri alla visuale, ecc. Quello che qui preme di evidenziare è la necessità di implementare e applicare queste strategie di *error detecting*, pena la mortificazione delle evidenti potenzialità del metodo e il declassamento della precisione che si può ottenere nelle elaborazioni di DEM basati su scansione terrestre.

Lidar aerotrasportato

L'*airborne laser scanning* è una metodologia di rilievo basata sulla scansione del territorio sorvolato da un aereo o da un elicottero per mezzo di un telemetro laser, che determina la distanza fra

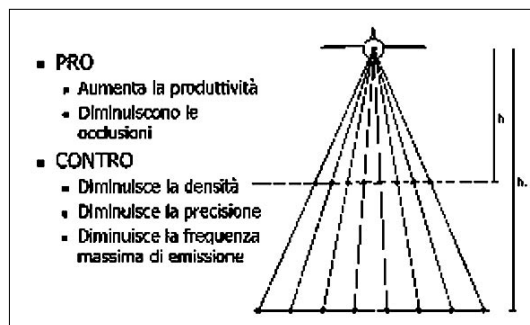


Figura 22

Relazione fra quota di volo e densità dei punti rilevati con scansione LIDAR

il punto di emissione, di fatto un telemetro, e il punto di riflessione costituito dal suolo.

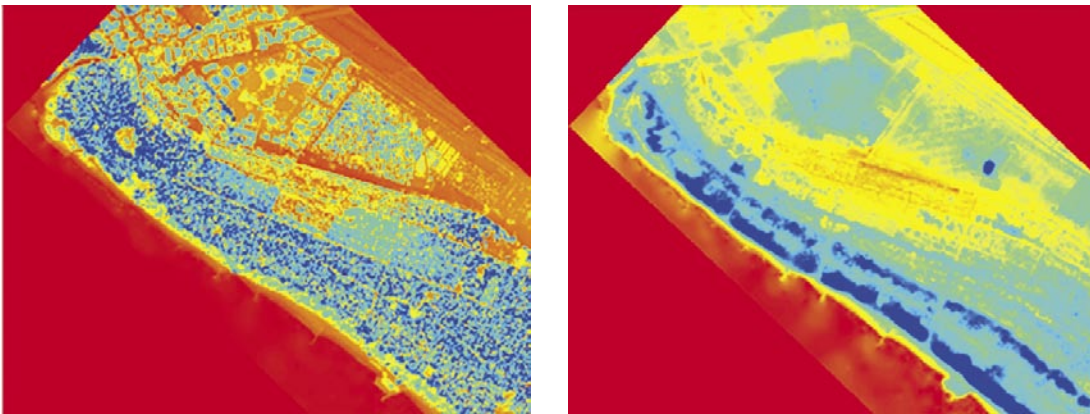
Il telemetro misura il tempo di andata e ritorno che l'impulso laser, riflesso dal terreno, impiega a percorrere il suo percorso. Il telemetro opera mediante un generatore di frequenza, che può essere pensato come una sorta di metronomo (*clock*) che scandisce con regolarità (fino a 8-10 GHz) il fluire del tempo; la distanza fra strumento e target (Fig. 21) è una semplice funzione del tempo che intercorre tra l'emissione e la ricezione del segnale riflesso (dato che la velocità di propagazione della luce è nota e può essere considerata costante).

Lo scanner laser non si limita a misurare la distanza fra strumento e terreno, ma fornisce le coordinate dei vari punti riflettenti. Perché questo sia possibile, si deve conoscere la posizione e l'assetto dell'aeromobile in ogni istante. Il GPS è in grado di fornire autonomamente le coordinate dell'aereo, ma nel caso della scansione laser è necessario conoscere anche l'orientamento del mezzo sul quale il telemetro è montato: a ciò provvede un sensore integrato GPS/IMU.

La precisione che può essere ottenuta con queste apparecchiature e la densità dei punti rilevati per unità di superficie sono evidentemente legati alle caratteristiche dei vari componenti la attrezzatura di misura e di controllo, ma anche alla quota di volo. Infatti l'angolo di abbracciamento della strisciata (Fig. 22) non può superare un valore determinato per ciascun modello di scanner; anche la frequenza di acquisizione dei punti ha un limite e varia con l'altezza relativa al suolo del sensore (prima di emettere un secondo raggio, il riflesso del primo deve essere ricevuto), per cui più bassa è la quota di volo, più densa è la matrice dei punti rilevati.

Di fatto, questa considerazione pone dei limiti operativi al metodo, in quanto la produttività più elevata si otterrebbe con quote relativamente alte (maggior abbracciamento, minor numero di strisciate, minore inclinazione dei raggi di misura a parità di superficie rilevata), mentre a queste si associa una minor densità angolare dei raggi e una minor precisione nelle determinazioni di posizione (gli errori dovuti alle incertezze sui parametri angolari di orientamento del raggio laser influiscono negativamente sulla posizione planimetrica dei punti rilevati).

Per quanto riguarda la precisione nella determinazione dei punti, in letteratura (French, 2002; Charlton, 2003) si hanno esperienze che la quantificano, mediante raffronti con rilievi topografici e/o GPS diretti, tra i 10 e i 40 cm in altezza; valori più precisi si ottengono per la planimetria. Soprattutto l'esperienza comparativa condotta dall'Università di Pavia (Casella, 2000 e 2002) fornisce dati di notevole interesse e analizza i meccanismi di generazione degli errori



DEM realizzato con rilievo Lidar da aereo sulla costa di Cecina Mare (a sinistra) e relativo Modello Digitale del Terreno realizzato mediante filtratura dell'eco prodotta dalla vegetazione (a destra)

Figura 23

suddividendoli in una parte sistematica (± 4 cm) e in una accidentale (± 6 cm). Huising (1998) propone accorgimenti simili a quelli impiegati nella fotogrammetria digitale (GCP, sovrapposizione tra strisciate contigue) per ridurre gli errori sistematici. Nel caso dei rilievi di spiagge questi accorgimenti sono indispensabili, data la rilevante influenza degli errori sistematici nei calcoli dei volumi e delle loro variazioni nel tempo.

Altri autori, oltre al già più volte citato gruppo di Casella, analizzano raffronti di precisione con la fotogrammetria analitica o digitale, mostrando risultati univocamente a favore del sistema LIDAR per quanto riguarda la precisione e la completezza del rilievo.

Per il progetto Beachmed è stato effettuato un rilievo il giorno 22/01/2004 pianificato secondo quanto descritto precedentemente. È stata utilizzata una strumentazione Optech ALTM con angolo di scansione di 0° - 20° e lunghezza d'onda pari a

1047 nm. La risoluzione dichiarata è di 1 cm con accuratezza in quota 15 cm. Oltre ai dati originali sono stati forniti un DTM ed un DEM (Fig. 23) con risoluzione 1 m x 1 m con sistema di riferimento WGS84 UTM 32, questo al fine di essere conformi e quindi confrontabili al contemporaneo rilievo GPS e da Laser scanner effettuato a terra. Il DTM consente di evidenziare la morfologia filtrata della vegetazione rispetto DEM in questo caso si riescono a distinguere i cordoni dunari sottostanti (Fig. 23). In Figura 24 viene riportato un esempio di sovrapposizione di un'ortomagine sul modello digitale del terreno.

Nell'area di prova del Gombo sono state realizzate 7 strisciate di larghezza pari a 500 metri circa e di lunghezza variabile tra i 4 e i 6 chilometri. Ciascuna "striscia" ha prodotto un DTM con maglia 1x1 m, costituito da 21 milioni di punti. In particolare, si intende attuare un'analisi comparativa tra i dati nella zona di intersezione tra le strip n. 4



DEM con sovrapposizione (georiferimento differenziale) dell'immagine RGB acquisita con fotocamera digitale

Figura 24

Tabelle 4 (a sx)
e 5 (a dx)

Raffronto fra i due DTM

<i>Scarto minimo</i>	-0.79
<i>Scarto massimo</i>	1.01
<i>Scarto medio</i>	0.03
<i>Varianza</i>	0.14
<i>N° outliers <-3v</i>	94
<i>N° outliers >+3v</i>	370
<i>Scarto medio corretto</i>	0.02
<i>Varianza corretta</i>	0.13

Raffronto fra il DEM della striscia n° 6 e il rilievo GPS

<i>Scarto minimo</i>	-0.96
<i>Scarto massimo</i>	1.34
<i>Scarto medio</i>	-0.11
<i>Varianza</i>	0.19
<i>N° outliers <-3v</i>	20
<i>N° outliers >+3v</i>	1
<i>Scarto medio corretto</i>	0.10
<i>Varianza corretta</i>	0.16

e n. 6 (Fig. 10; area del Gombo) dove sono stati eseguiti anche altri tipi di rilevamento.

Allo stato attuale è ancora in corso lo studio per la validazione e la verifica del rilievo Lidar. In linea di massima possiamo dire che sarà applicata lo stesso tipo di analisi e metodologia usata per verificare il rilievo da Laser scanner terrestre.

Una prima prova per la valutazione del rilievo eseguito al Gombo è stata comunque effettuata

utilizzando i DEM (lato 1 m) forniti dalla ditta incaricata dei rilievi per verificare la ripetibilità del rilievo. Infatti le “strisciate” 4 e 6 (vedi Fig. 10) si intersecano quasi ortogonalmente tra di loro proprio nell’area già rilevata contemporaneamente con metodologie GPS RTK e mediante scansione laser terrestre.

Il raffronto tra i 2 DTM, eseguito in un’area rettangolare di prova comprendente 24650 punti, ha dato i seguenti risultati riportati in Tabella 4.

Come si vede ci sono variazioni alquanto significative in un discreto numero di punti (quasi il 2%), anche la planimetria delle differenze (Fig. 25), realizzata con Surfer8, conferma una sostanziale concordanza tra i rilievi, ma anche la presenza di non pochi *outliers* (scarti superiori in valore assoluto a 3 sigma). La precisione media (varianza) è quasi accettabile, ma la presenza di un errore medio (probabilmente di tipo sistematico) di 0.023 m, soprattutto su un’area abbastanza vasta, rende evidente la necessità di un affinamento dell’analisi ricorrendo ai dati originali.

Anche il confronto tra il DEM della striscia n. 6 e il rilievo GPS ha determinato alcune perplessità (Tabella 5).

Sui 630 punti confrontati, solo 21 hanno uno scarto dalla media superiore a 3 sigma, ma il segno prevalentemente negativo degli scarti conduce a una differenza media tra le due superfici di circa 10 cm, con una varianza un po’ troppo elevata. Anche per analizzare meglio questo risultato si è deciso di richiedere alla ditta esecutrice del rilievo l’accesso ai dati originali, in modo da chiarire il più possibile l’origine di queste differenze.

I dati originali sono composti da diverse strisciate sovrapposte, 2 per la strip n. 4 (4a e 4b) e ben 3 per quella n. 6 (6a, 6b, 6c). L’area “coperta” dalle strisciate comprendeva le scogliere e anche numerosi punti riflessi dalla superficie del mare, per cui

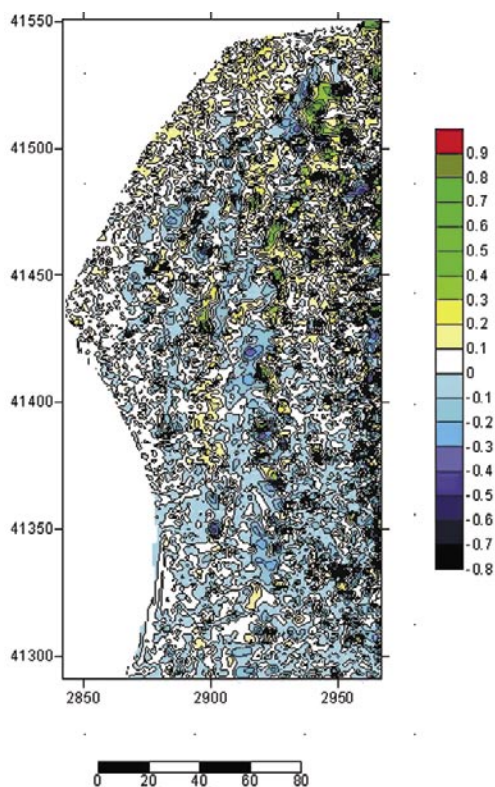


Figura 25

Planimetria a curve di livello delle differenze calcolate sulle quote dei nodi dei DEM delle strisciate LIDAR che si incrociano sull’area del Gombo

si è provveduto a delimitare l'area di indagine all'interno del "rettangolo" costituito dalla cornice di Figura 26, mentre una limitazione delle quote (ellissoidiche) ritenute "accettabili" al valore di 46.45 metri determinato, come si è visto, con il metodo di rilievo GPS, ha portato a una selezione efficace dei soli punti "emersi".

Immagini da satellite

Il telerilevamento ha dimostrato di essere un sistema affidabile e con un favorevole rapporto costi/benefici per l'analisi territoriale a media e piccola scala. Fino a pochi anni addietro la risoluzione dei sensori posizionati su piattaforme spaziali produceva immagini con dimensioni dei pixel al suolo di 30 metri (Landsat), 20 metri (SPOT multispettrale) e 10 m (SPOT Pancromatico), non sufficienti per il posizionamento della linea di riva o delle opere di difesa.

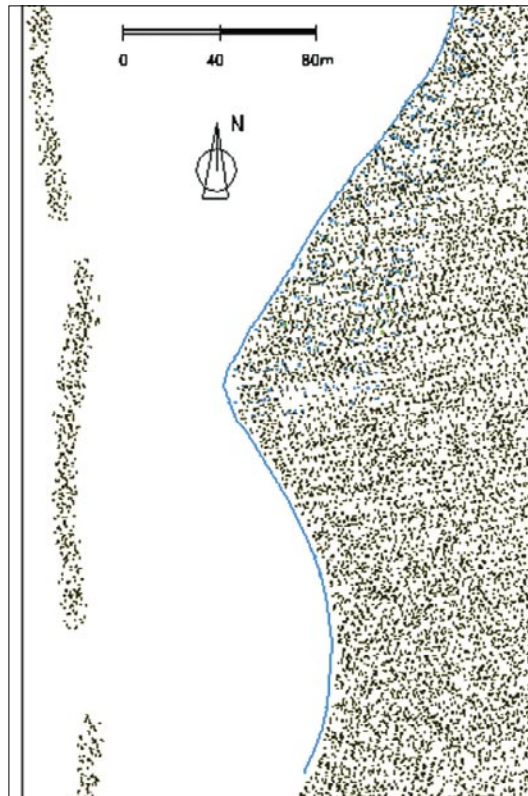
La messa in orbita di sensori ad alta risoluzione Ikonos (4 m multispettrale ed 1 m pancromatico) e Quickbird (2,4 m multispettrale e 0,61 m pancromatico) ha aperto nuove prospettive in questo campo, anche se non sono stati effettuati sufficienti studi per la validazione dei dati. Nell'ambito del Progetto Beachmed queste tecniche sono in fase di sviluppo e di analisi mediante il confronto fra linee di riva ottenute sia con fotointerpretazione dell'immagine che con tecniche di riconoscimento automatico e linee ottenute con misure GPS condotte in contemporanea o poche ore dopo l'acquisizione del dato telerilevato.

Per la digitalizzazione della linea di riva si è reso necessario avere una georeferenziazione, il più precisa possibile, delle immagini satellitari. Per fare ciò si è deciso di utilizzare il software della Research Systems, Envi v.4.0. Si è provveduto ad effettuare la georeferenziazione in tre modi diversi per vedere il grado di precisione ed il tempo necessario alla stessa.

La prima, e più veloce, è stata effettuata per mezzo di 5 punti presi dalla Carta Tecnica Regionale vettoriale della Regione Toscana e posti in prossimità della linea di riva, in modo da avere un grado di distorsione minimo proprio in prossimità di quest'ultima.

Per il *warping* dell'immagine è stata utilizzata la trasformazione polinomiale di 1° grado, l'unica possibile con un così ridotto numero di punti.

Ogni volta, poi, che su un'immagine viene applicata una trasformazione geometrica per rettificarla, il risultato è che i pixel si trovano in una nuova posizione, più accurata, ma la cui radiometria non rappresenta più i valori reali misurati sulla scena. Una stima dei nuovi valori di radianza e quindi dei nuovi numeri digitali dei pixel viene fatta mediante delle procedure di interpolazione matematica che sono dette tecni-



Area impiegata per l'analisi delle misure LIDAR originali

Figura 26

che di ricampionamento (Gomasca, 1997). Gli algoritmi di ricampionamento più diffusi sono tre: *Nearest neighbor* (prossimo più vicino), *Bilinear* (bilineare) o *Cubic* (cubico). Nel nostro caso si è deciso di utilizzare il ricampionamento nearest neighbor in quanto è quello che non modifica i valori digitali. Questo perché associa il valore del pixel dell'immagine "deformata" a quello più vicino dell'immagine di partenza. Gli altri due, invece, associano al pixel "deformato" la media dei 4 pixel adiacenti (bilinear) o dei 16 pixel



Particolare dell'immagine QuickBird con alcuni GCP

Figura 27

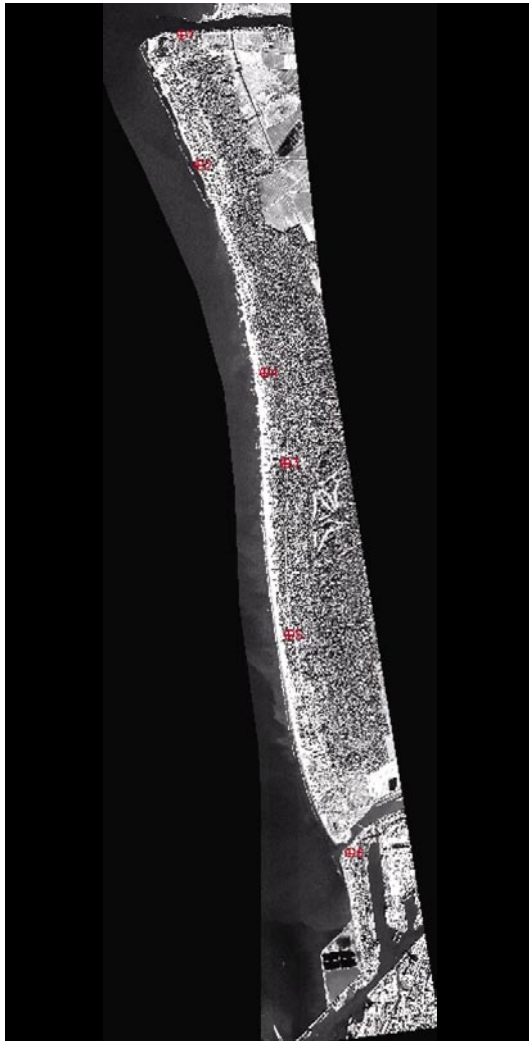


Figura 28

Immagine QuickBird georeferenziata con 6 GCP rilevati con GPS

adiacenti (cubic), modificando il valore dello stesso. Abbiamo scelto di operare in un tale modo in quanto, volendo rilevare il confine terra-mare, abbiamo reputato opportuno che i valori dei pixel non fossero modificati.

La seconda georeferenziazione è stata effettuata per mezzo di 34 punti presi, come prima, dalla CTR vettoriale della Regione Toscana, distribuiti in modo uniforme su tutta l'immagine (Fig. 27).

Questa volta è stato possibile effettuare la georeferenziazione utilizzando le trasformazioni polinomiali di 1°, 2° e 3° ordine.

Si è deciso poi di utilizzare la polinomiale di 1° ordine dato che, sebbene la georeferenziazione abbia un errore medio minore per le trasformazioni di ordine superiore, con esse si ottiene anche una distorsione maggiore nelle zone lontane dai CGP (punti di controllo) con i quali si è effettuato il *warping* dell'immagine. Essendo difficile trovare punti di controllo nella zona in prossimità della riva, ed in particolare in mare, le immagini georeferite con polinomiali di 2° e 3° ordine erano

più precise nelle zone intensamente urbanizzate, dove maggiori erano i punti di controllo, e meno proprio dove volevamo avere il massimo grado di precisione. Anche in questo caso si è optato per il ricampionamento *nearest neighbor*.

La terza georeferenziazione è stata effettuata mediante 6 punti di controllo (Fig. 28) rilevati per mezzo di un rilievo GPS in modalità cinematica con una precisione di circa 20 cm. Come negli altri due metodi si è optato per il ricampionamento *nearest neighbor*.

A questo punto si è effettuato il confronto tra le tre immagini georeferite per vedere quale delle tre fosse la migliore. Si è provveduto a confrontare dapprima le due immagini georeferite per mezzo della CTR vettoriale e si è visto, come era da aspettarsi, che quella georeferita con un numero di punti maggiori è anche quella con il minore errore. Abbiamo visto, però, che la differenza media tra la posizione di un *dataset* di punti omologhi è di circa 1.4 metri. In caso si volesse operare con estrema celerità, si potrebbe quindi georeferire anche utilizzando solamente 5 punti.

Il successivo controllo è stato fatto tra le due immagini georeferite con i 34 punti CTR ed i 6 punti GPS. In questo caso si è visto che la discrepanza tra le due immagini è maggiore ed aumenta andando da nord verso sud, raggiungendo nella parte più meridionale i 14.5 metri. Sembra quindi che ciò sia dovuto alla scarsa precisione della CTR vettoriale, avendo il rilievo GPS la medesima precisione per tutti e 6 i punti rilevati.

Nel prosieguo di questo progetto cercheremo di capire quale dei due sistemi di georeferenziazione permette di avere la precisione maggiore e se, aumentando i punti di controllo rilevati con il GPS, diminuisce la discrepanza tra le due immagini.

La scelta di operare con solo 6 punti rilevati col GPS è stata dettata dal fatto che il rilievo in automatico della linea di riva è economicamente vantaggioso se si riesce ad operare con tempi minori di quelli necessari al rilievo celerimetrico o al rilievo con il GPS cinematico. Per effettuare la registrazione di un punto di controllo GPS, tenendo conto anche degli spostamenti, sono infatti, necessari molti minuti, che vanno sommati ai tempi di elaborazione. L'acquisizione di un elevato numero di GCP può richiedere quindi più tempo del rilievo stesso della linea di riva con GPS e non sempre i punti di controllo rilevati per la georeferenziazione di una immagine sono utilizzabili per altre immagini.

Una volta georeferenziata l'immagine è necessario estrarre la linea di riva, cosa che può essere fatta sia con i tradizionali metodi della fotointerpretazione che con quelli classici dell'*image processing*. In questa parte del Progetto è stata sviluppata e testata una procedura per l'estrazione automatica della linea di riva da un'immagine

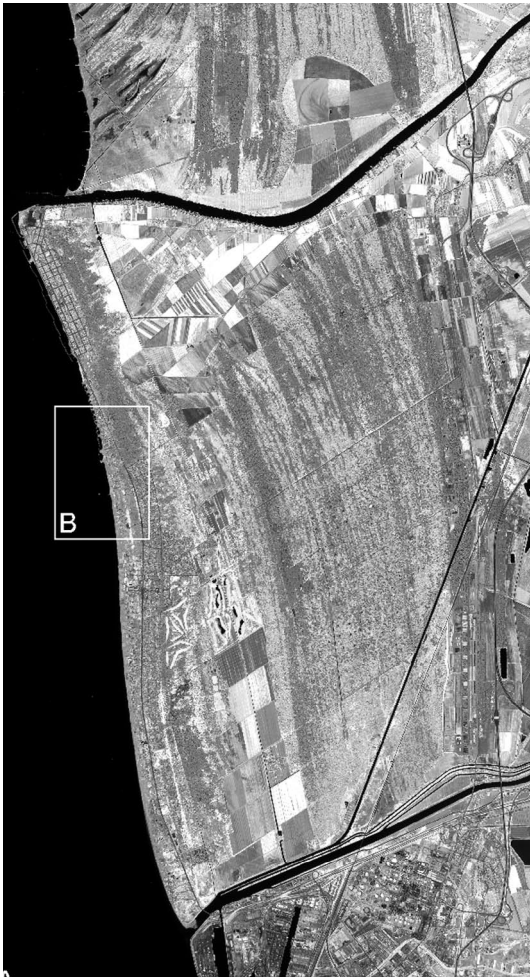


Immagine Ikonos del 15/06/2002 georeferenziata, Banda 4 (IR)

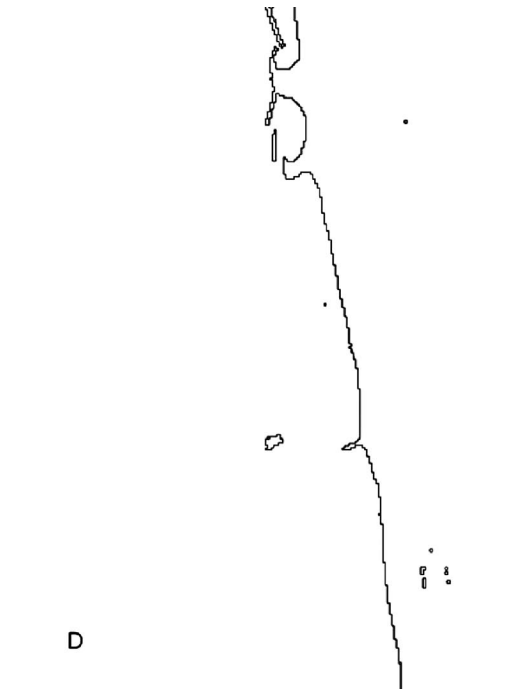


Immagine Ikonos del 15/06/2002 con ubicazione della zona di studio

Figure 29 e 30



Density slicing in due livelli dell'Immagine Ikonos



Estrazione della linea di riva mediante filtro passa alto

Figure 31 e 32

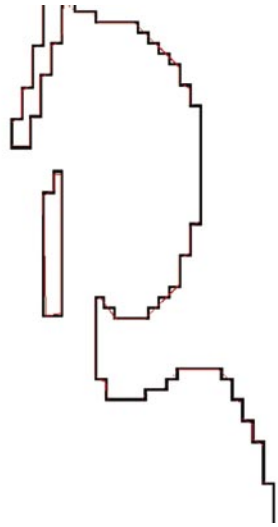


Figura 33

Esportazione dell'immagine raster della linea di riva e sua vettorializzazione in Autocad

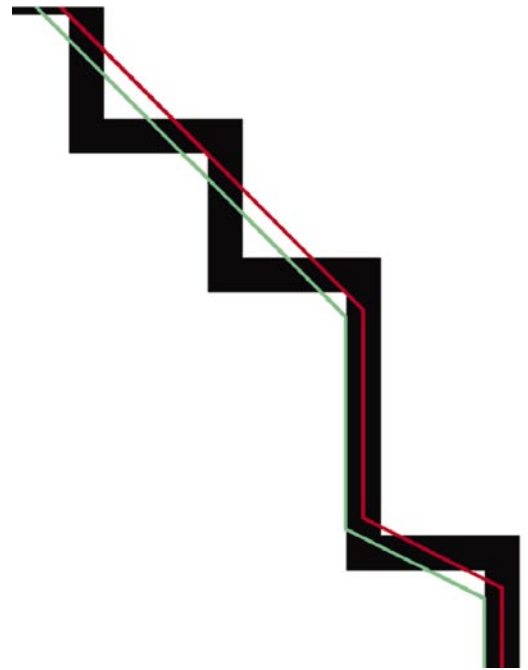


Figura 34

Traslazione del vettore di 0,5 pixel per posizionarlo nel punto di contatto fra i pixel di terra e quelli di acqua

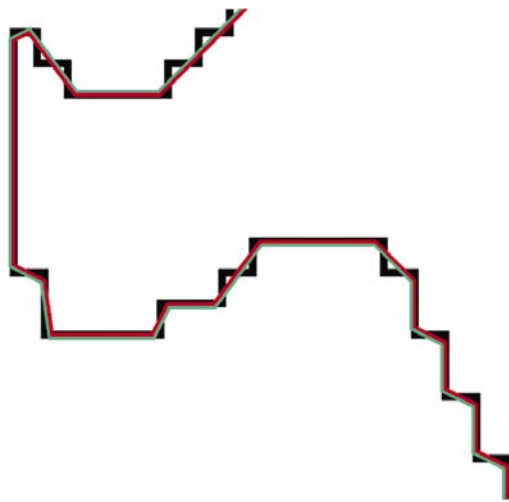
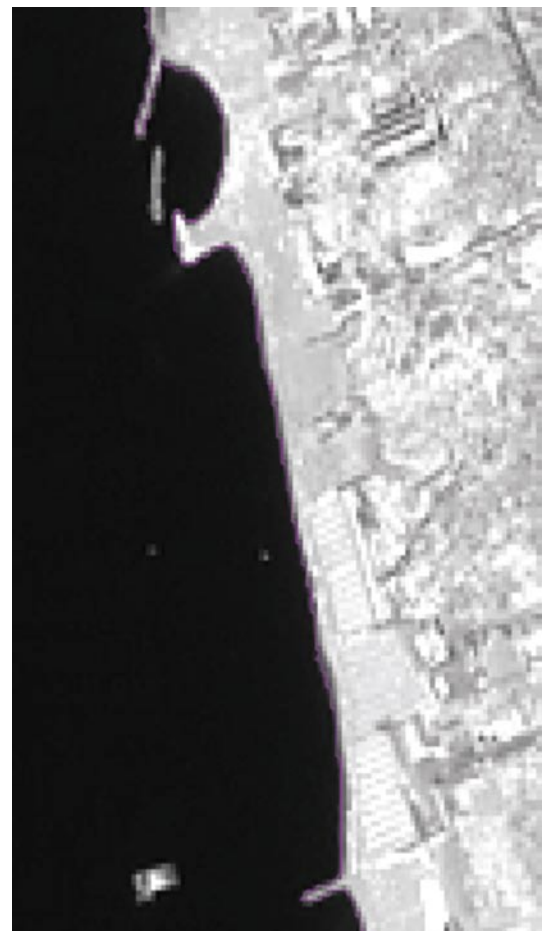


Figura 35

Traslazione della linea di riva in funzione della marea e della pressione atmosferica nel momento dell'acquisizione e della pendenza media della battigia

Figura 36

Sovrapposizione della linea di riva all'immagine Ikonos originale





Telecamera per il video monitoraggio posta nel sito di Alassio

Figura 37

telerilevata che viene descritta in modo schematico:

1. georeferenziazione dell'immagine;
2. *density slicing* per la separazione terra/mare (sia sulle immagini multispettrali che su quella pancromatica) (Fig. 31);
3. applicazione di un filtro digitale passa alto per il tracciamento della linea di riva (Fig. 32);
4. esportazione dell'immagine raster della linea di riva e sua vettorializzazione in Autocad (Fig. 33);
5. traslazione del vettore di 0,5 pixel per posizionarlo nel punto di contatto fra i pixel di terra e quelli di acqua (si ottiene così la linea di riva del momento dell'acquisizione) (Fig. 34);
6. traslazione della linea di riva in funzione della marea e della pressione atmosferica nel momento dell'acquisizione e della pendenza media della battigia ottenuta da misure dirette e considerata invariabile (Fig. 35)

Il confronto della linea di riva così ottenuta con quella rilevata direttamente sulla spiaggia con GPS indica che il sistema, quale quello da noi adottato, comporta un errore medio di 1-2 pixel, cosa accettabile solo nell'ambito di un monitoraggio di lungo termine in litorali soggetti a variazioni morfologiche consistenti. Per quanto riguarda la costa toscana, solo pochi tratti mostrano uno

spostamento medio annuale della linea di riva dello stesso ordine di grandezza.

La possibilità teorica di frequenti ripetizioni della misura, dati i brevi tempi di rivisitazione dei satelliti, potrebbe portare ad una posizione media su breve periodo di maggiore accuratezza, ma che verrebbe ad avere un costo elevato.

La frequenza di acquisizione di immagini utili è comunque assai maggiore del tempo di rivisitazione, sia per la presenza di copertura nuvolosa che per l'inutilità delle immagini rilevate durante eventi meteomarini anche modesti.

Video sistemi

Il monitoraggio dell'evoluzione della spiaggia può essere effettuato con rilievi ad elevata frequenza per mezzo di telecamere installate su punti prominenti del paesaggio o su supporti appositamente posizionati. L'immagine acquisita è obliqua e necessita di una operazione di ortorettificazione oltre che di una georeferenziazione. È possibile acquisire immagini in continuità per studiare la risposta della spiaggia a singoli eventi meteomarini, oppure immagini giornaliere o con periodicità più alta per valutare l'evoluzione su breve periodo, in genere a seguito della realizzazione di interventi di difesa.

Dall'immagine ortorettificata e georeferenzata è possibile estrarre la linea di riva, sia con proce-



Figura 38

Immagini riprese dalle telecamere di Alassio verso la spiaggia su cui è installato il sistema di drenaggio (sinistra) e su quella di controllo (a destra)

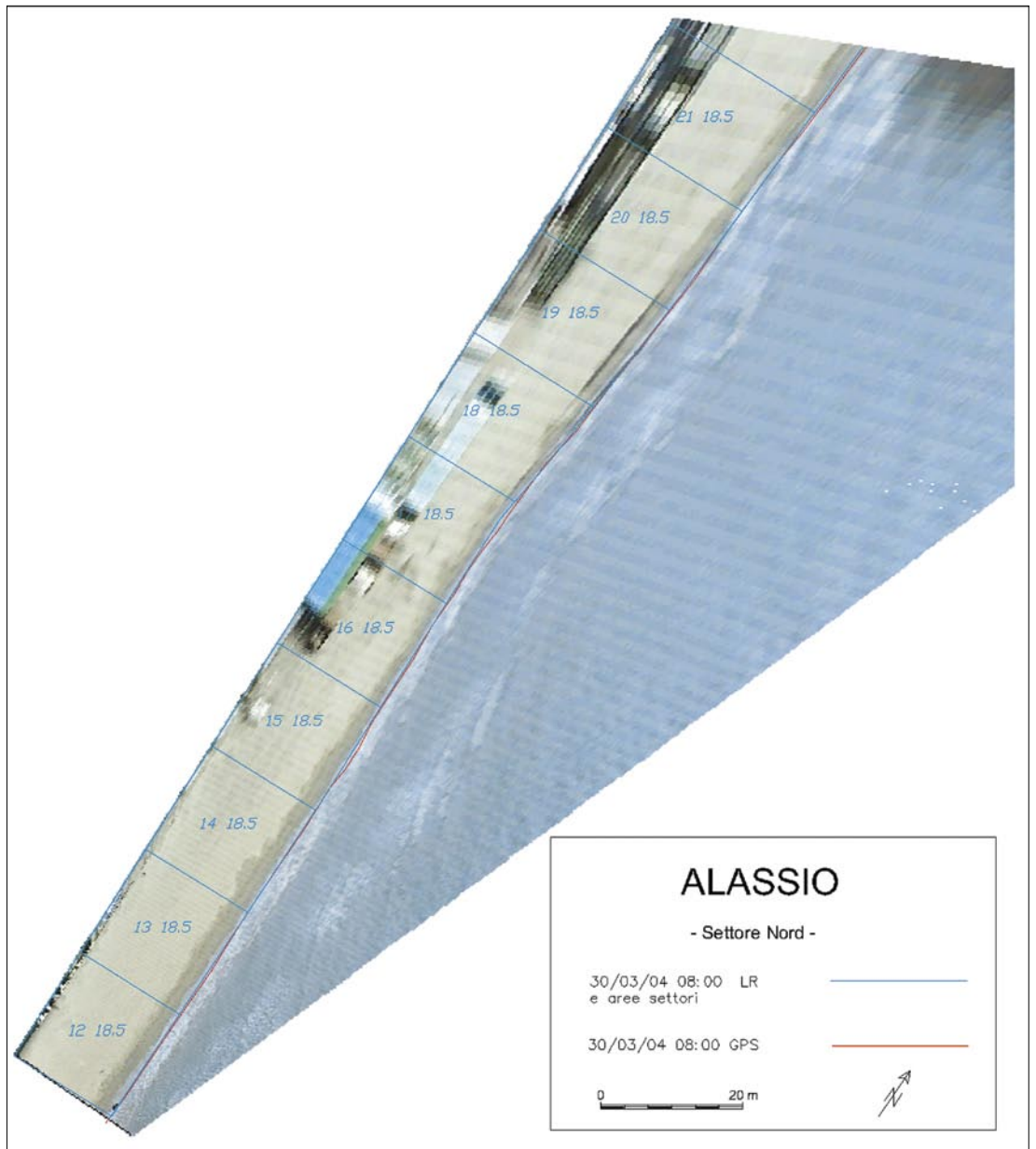


Figura 39

Immagine georeferita e ortorettificata ripresa nel tratto di litorale su cui è installato il sistema di drenaggio con sovrapposta la linea di riva estratta per fotointerpretazione e quella rilevata con GPS. Sono indicati anche i settori per i quali viene calcolato lo spostamento medio della linea di riva

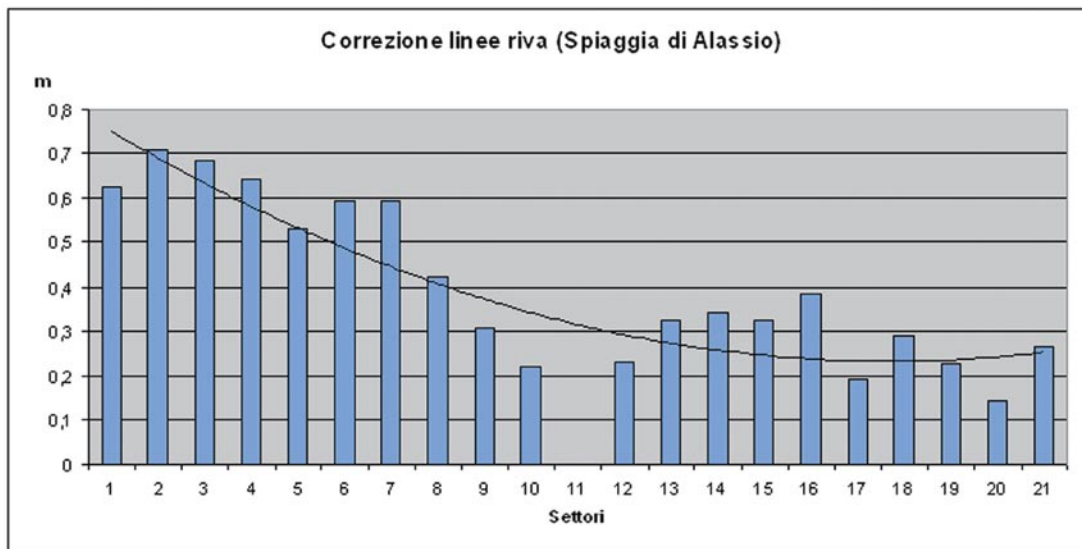


Grafico dello scostamento della linea di riva digitalizzata su immagine da telecamera rispetto a quella rilevata con GPS. Le due telecamere sono posizionate nel settore 11; si nota uno scostamento minore per la telecamera che guarda i settori 12-21, quelli oggetto dell'intervento di stabilizzazione

Figura 40

ture automatiche che tramite fotointerpretazione. In entrambi i casi si devono affrontare tutte le problematiche messe in evidenza per le foto aeree e per le immagini da satellite.

Nell'ambito del Progetto Beachmed sono state installate due coppie di telecamere: una nella spiaggia modello di San Rossore ed una coppia sulla spiaggia di Alassio (Fig. 37). Entrambe le telecamere acquisiscono tre immagini al giorno, una delle quali è immediatamente accessibile a chiunque su internet (www.seatech.it/allassio; www.seatech.it/rossore).

Le due telecamere di San Rossore sono posizionate su di un palo alto 8 metri e posto dietro la prima duna e guardano, in direzioni opposte, un tratto di litorale difeso da scogliere parallele. L'operatività del sistema è stata assai ridotta dato che l'obiettivo delle telecamere viene coperto rapidamente da sale e sabbia. Le condizioni in cui opera sono estremamente delicate poiché il tratto di costa osservato presenta una falcatura che fa variare in continuità l'angolo formato fra l'asse dell'obiettivo e la linea di costa, fino ad avere un'osservazione ortogonale a riva. Sarà quindi possibile, tramite il confronto con le linee di riva rilevate con GPS, valutare l'accuratezza della linea di riva in funzione dell'angolo di osservazione.

Le due telecamere di Alassio sono posizionate in condizioni assai più favorevoli sulla terrazza posta al quinto piano di un albergo posto sulla spiaggia. Una guarda un tratto di spiaggia nel quale è stato installato un impianto di drenaggio della spiaggia con lo scopo di fare espandere l'arenile, l'altra in un tratto adiacente in condizioni naturali (Fig. 38).

Sono stati effettuati rilievi topografici della spiaggia sia per ottenere la posizione della linea di riva,

da confrontare con quella estratta dalle immagini (Fig. 39), che la pendenza della battigia, per apportare le correzioni di marea e di pressione atmosferica.

L'elaborazione ed il confronto fra i dati (Figg. 39 e 40) mette in evidenza che in condizioni di mare calmo il riconoscimento della linea di riva sulle immagini generate dalla telecamera è affetto da un errore medio di circa 0.5 m, valore accettabile anche in considerazione dell'elevato numero di immagini acquisibili che può portare ad una riduzione dell'errore inerente a ciascuna singola misura. Il calcolo è stato fatto su tutto il tratto di costa ripreso dalla camera e diviso in 21 settori di lunghezza omogenea.

Questa tecnologia di video monitoraggio non consente comunque la realizzazione di un modello digitale del terreno e la valutazione delle variazioni volumetriche della spiaggia.

Metodi di acquisizione dei dati della spiaggia sommersa

Sea sled, CRAB (*Coastal Research Amphibious Buggy*)

La *sea sled* è una slitta (con varianti su ruote) sulla quale è posta un'asta graduata in posizione verticale. La slitta, che poggia sul fondo del mare, viene prima trainata verso il largo da una imbarcazione e poi recuperata verso riva tramite un verricello le cui rotazione segna la lunghezza del cavo recuperato e quindi del tratto che via via viene coperto dalla slitta. L'asta che emerge dalla superficie del mare indica la profondità dell'acqua che viene letta da terra con un cannocchiale,

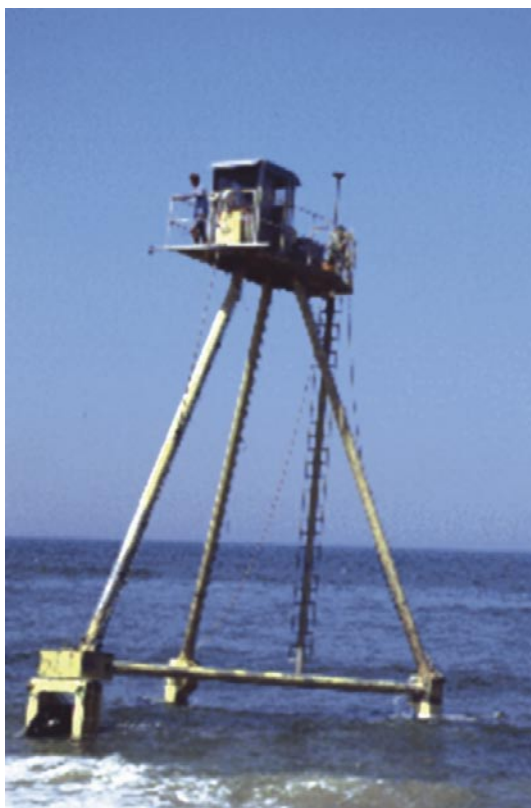


Figura 41

Esempio di CRAB in azione sulle coste statunitensi

Con questo sistema si possono eseguire profili di spiaggia di buona precisione (3 cm in quota), ma l'operatività è ridotta ed i tempi di esecuzione assai lunghi. Il sistema, molto utilizzato negli Stati Uniti, ha trovato una ridotta applicazione in Europa e non risulta che in Italia siano mai state costruite o adottate slitte di questo tipo. Sono stati sviluppati anche veicoli semoventi in

grado di acquisire la propria posizione e profondità, tramite GPS cinematico, fra i quali il CRAB (Coastal Research Amphibious Buggy; Fig. 41) è il più collaudato (Dean, 2002).

Rilievo con ecoscandaglio (*singlebeam*)

Il rilievo batimetrico con ecoscandaglio (*singlebeam*) è il sistema attualmente più utilizzato per effettuare i rilievi idrografici. Viene eseguito con una imbarcazione di contenuto pescaggio, capace quindi di rilevare anche in bassi fondali, e opportunamente attrezzata che percorre, a bassissima velocità, le rotte di progetto, spesso perpendicolari alla linea di riva (Fig. 42). Queste generalmente rappresentano il proseguimento delle sezioni utilizzate per il rilievo della spiaggia emersa. Vengono spesso effettuate anche alcune rotte perpendicolari alle precedenti come controllo delle quote agli incroci. Il rilievo viene effettuato a mare calmo ed in assenza di vento.

Il sistema è generalmente composto da un calcolatore di bordo in cui è installato il software di navigazione ed un ecoscandaglio in asse con il sistema ricevente (GPS-DGPS-Prismi). Questo consente anche ad un solo operatore di svolgere il rilievo.

Una configurazione completa di un sistema integrato *singlebeam* dovrebbe essere composta dai seguenti apparati:

- sistema di posizionamento superficiale (DGPS, RTK, sistemi ottici, sistemi *range-range*, sistemi *range bearing*);
- sistema di acquisizione ed elaborazione dati composto da hardware e software general-

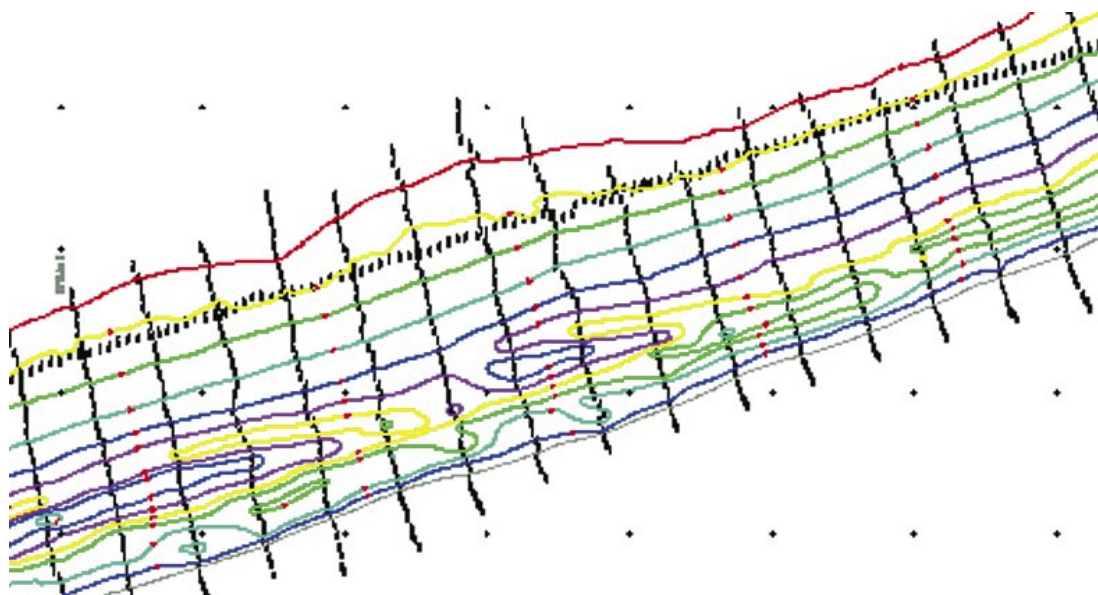


Figura 42

Esempio di rilievo *singlebeam* a rotte parallele nell'area test della Tenuta di San Rossore

- mente dedicati a questo specifico scopo;
- ecoscandaglio idrografico professionale (Fig. 43);
- compensatore d'onda per la correzione delle profondità rilevate in relazione al moto ondoso;
- compensatore di moto per la correzione delle profondità rilevate in funzione dei movimenti di rollio e beccheggio del trasduttore dell'ecoscandaglio (generalmente non utilizzato);
- sonda di velocità del suono in acqua (non sempre utilizzata);
- mareografo (non necessario se si utilizza un sistema di posizionamento RTK).

L'uso di un GPS "RTK" offre notevoli vantaggi in quanto, oltre alle coordinate planimetriche, calcola anche la quota assoluta del trasduttore in tempo reale e con precisione centimetrica. Diventa possibile, in abbinamento con i dati provenienti dall'ecoscandaglio, correggere così automaticamente tutte le oscillazioni della superficie marina (marea, onde, soprizzo dovuto alla massa d'acqua spinta dal vento) durante il rilievo batimetrico.

Gli ecoscandagli *singlebeam* utilizzati sono di tipo idrografico con risoluzione digitale di 1 cm. Il trasduttore emette un impulso sonoro, il segnale di ritorno dell'onda riflessa dal fondo viene rilevato dalla sonda. Il tempo di ritorno del segnale dipende dalla velocità del suono in acqua. Il rilievo risulta quindi puntuale sotto la traiettoria dell'imbarcazione. La frequenza adottata è generalmente di 200 KHz; un buon compromesso per garantire un rilievo accurato del fondale con poca interferenza della colonna d'acqua. In generale le frequenze più usate sono da 100-1000 kHz. La determinazione della velocità del suono in acqua è forse la procedura più difficile di tutta l'operazione. La velocità del suono varia infatti con la densità e le proprietà elastiche dell'acqua che sono funzione della temperatura, dei materiali in sospensione o dissolti e della salinità. L'ecoscandaglio viene quindi tarato per la temperatura dell'acqua e la salinità, o direttamente ad una profondità nota tramite il metodo "bar check", ovvero facendo riferimento ad una apposita piastra metallica calata in acqua a profondità note.

Nelle acque basse la temperatura e la salinità variano notevolmente. Un aumento di 5° in 5 metri di profondità può causare un errore fino a 10 cm (Gibeaut, 1998).

Anche il cono di apertura del segnale dei vari trasduttori influenza notevolmente la precisione del rilievo. La porzione di fondale insonificata dal sonar è uguale a:

$$P = 3.14 D^2 \tan^2 (a/2),$$

dove: D è la profondità ed "a" rappresenta l'angolo di illuminazione in gradi del segnale. Ad esem-



Ecoscandaglio idrografico Odom Hydrotrac

Figura 43

pio ad una profondità di 15 m un trasduttore con apertura di 1.5 deg copre un'area di 40 cm contro i 5.5 m per uno a 20 deg.

Ulteriori sensori permettano le correzioni per il rollio ed il beccheggio dell'imbarcazione che provocano errori anche notevoli nelle misure. Ad esempio, 8° di inclinazione a 10 metri di profondità causano un errore di 10 cm sulla quota e 150 sulla planimetria (Gibeaut, 1998). È quindi fondamentale eseguire il rilievo a mare completamente calmo.

L'errore probabile sulle misure di profondità, tenendo conto anche dell'errore proprio di un ecoscandaglio di precisione, può essere stimato in condizioni ottimali pari a circa ± 7 cm, normalmente invece la precisione dei rilievi è dell'ordine di ± 17 cm. La precisione scende ulteriormente se non vengono effettuate le correzioni di marea o se non viene controllata periodicamente la taratura dell'ecoscandaglio (Aminti, 1999).

Per il progetto Beachmed, nel gennaio 2004, è stato effettuato un rilievo dalla foce del Fiume Arno fino a quella del Fiume Morto (PI). Sono state effettuate circa 90 sezioni con equidistanza da 50 a 100 metri fino alla profondità di dieci metri, sul prolungamento delle sezioni a terra.

Il rilievo è stato eseguito con una imbarcazione predisposta per lavorare su bassi fondali (Canadian 4.30 della Italmarine; Fig. 44) adeguata alle esigenze della rilevazione con stabilizzatori di rollio e fornita, per la determinazione della posizione planimetrica, di un sistema GPS differenziale *LandStar Surveyor*, dotato del servizio satellitare di trasmissione delle correzioni differenziali.

L'imbarcazione inoltre era equipaggiata con il programma di navigazione WinBat e di un eco-



Figura 44

Imbarcazione utilizzata per rilievo il singlebeam nel tratto di mare antistante la costa pisana

scandaglio idrografico a singola frequenza 500 KHz HSL-ES 305 con cono di emissione di 4° e range di impiego che di 0.30 a 60 metri.

Sono state misurate 5 verticali al secondo ad una velocità di crociera di circa tre nodi.

Per ogni sezione di lavoro si è provveduto alla taratura dello scandaglio tramite piastra equidistante collocata alla profondità di 2 e 9 metri (metodo *bar check*).

L'editing della strisciata digitale ha visto la correzione tramite programmi adeguati dei disturbi dovuti al moto ondoso, alla marea, che è stata rilevata contestualmente.

Il rilievo in mare è stato integrato con quello topografico del fondo in prossimità della riva e della parte emersa. È stato quindi effettuato il controllo delle sezioni attraverso il confronto con i dati provenienti dal rilievo di ulteriori sezioni trasversali.

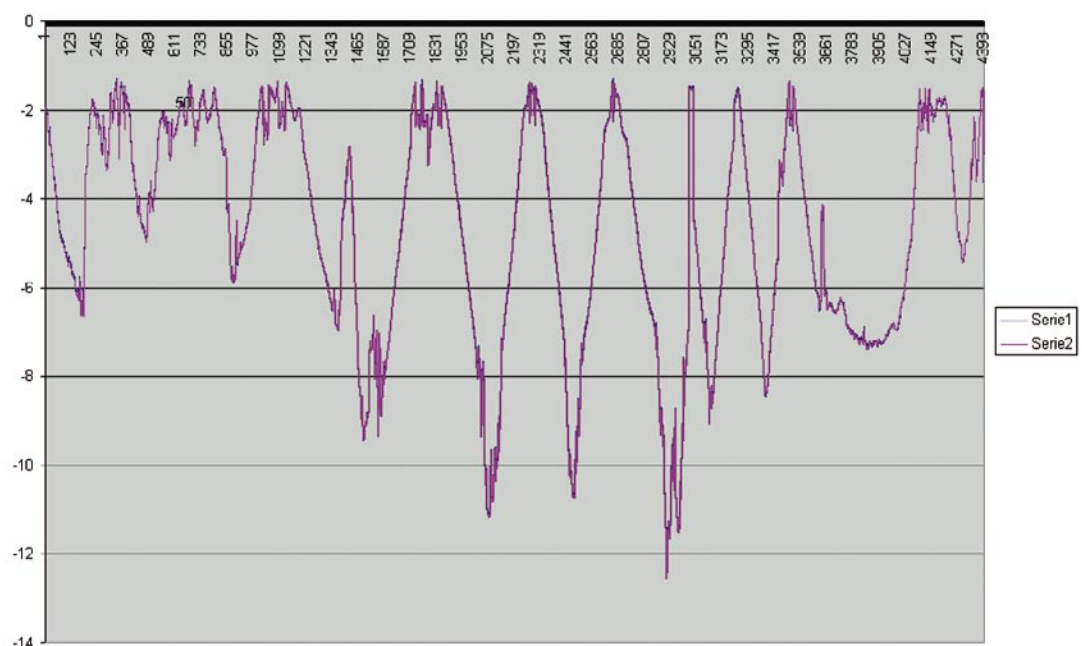
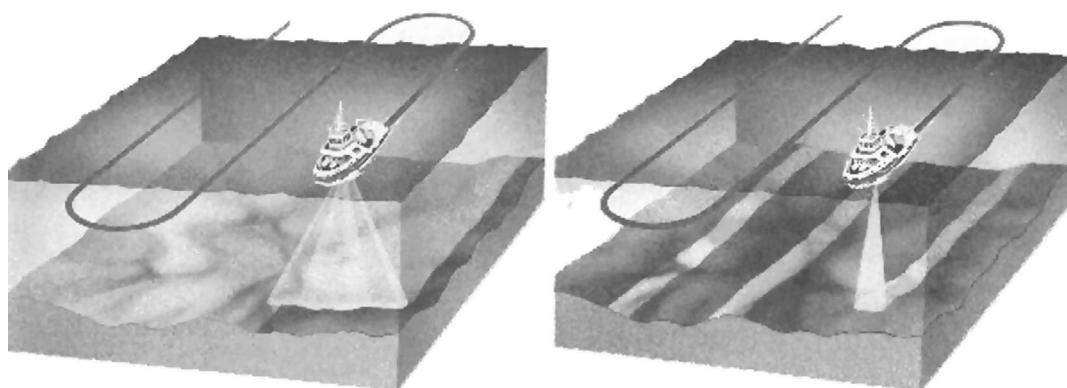


Figura 45

Confronto fra i dati batimetrici acquisiti con (linea blu) e senza (linea viola) correzione "RTK"



Esempio di fascia di acquisizione di un sistema multibeam (a sinistra) e singlebeam (a destra)

Figura 46

Oltre ai dati originali di rilievo sono stati prodotti profili di sezioni a scala 1:2000/1:200 e la cartografia a scala 1:2000/1:5000. Questo rilievo è stato eseguito in contemporanea ad un rilievo con tecnologia *multibeam* per effettuare un confronto fra le due tecnologie.

Nel febbraio 2004 sono stati eseguiti ulteriori rilievi di confronto all'Isola d'Elba nei Golfi di Procchio, Spartaia e Sant'Andrea ed ulteriori test sono attualmente in fase di svolgimento.

Una prova che è stata ulteriormente effettuata nel Golfo di Procchio è stata la verifica di un rilievo *singlebeam* eseguito senza correzione della quota del GPS "RTK". I dati riferiti alla quota sono stati infatti registrati separatamente all'interno del ricevitore GPS e quindi non sono stati accoppiati in tempo reale a quelli di profondità provenienti dall'ecoscandaglio. Il rilievo è stato effettuato a mare completamente calmo. I dati di profondità sono stati quindi corretti con i dati di marea e paragonati successivamente a quelli aventi la correzione di quota GPS. Il risultato ottenuto (Fig. 45) mostra due *set* di dati sono praticamente identici durante tutto l'arco del rilievo.

Rilievo con *multibeam*

Il sistema *multibeam* è una tecnologia che consente di avere una mappatura di alta definizione del fondale marino investigato. Rispetto alle classiche metodologie di rilievo batimetrico con un normale ecoscandaglio, questa tecnica si caratterizza per la notevole mole di dati acquisiti nella stessa unità di tempo (Fig. 46).

Si tratta di una strumentazione che, anziché misurare una sola profondità ne misura 60, 100 o 240 contemporaneamente a seconda della sua apertura angolare (Fig. 47). Oggettivamente l'utilizzo di un sistema *multibeam* aumenta in modo esponenziale le potenzialità di un singolo ecoscandaglio (Maso, 2002).

Tecnicamente esso può essere descritto come un

sonar acustico che rileva le distanze tra il trasduttore ed il fondale marino o qualsiasi altro target presente sul fondo.

Il trasduttore del sistema è composto da tanti ricevitori che rilevano l'eco di ritorno proveniente dal suono emesso dal trasmettitore e riflesso dal fondo.

Uno strumento con apertura di 90° rileva una porzione di fondale pari a due volte la profondità presente al di sotto del trasduttore, mentre un'apertura di 150° arriva fino a sette volte.

La spaziatura tra i singoli segnali, a sua volta, determina il grado di risoluzione spaziale con cui uno strumento è in grado di discernere gli oggetti presenti sul fondo; uno strumento con una spaziatura di 0.5°, in opportune condizioni, sarà in grado di rilevare anche una piccola condotta presente sul fondo.

In ogni istante il fascio emesso e rilevato dal trasduttore di un *multibeam* deve essere posizionato



Sistema 8101 Reson: trasduttore, unità di superficie e schermo di controllo

Figura 47

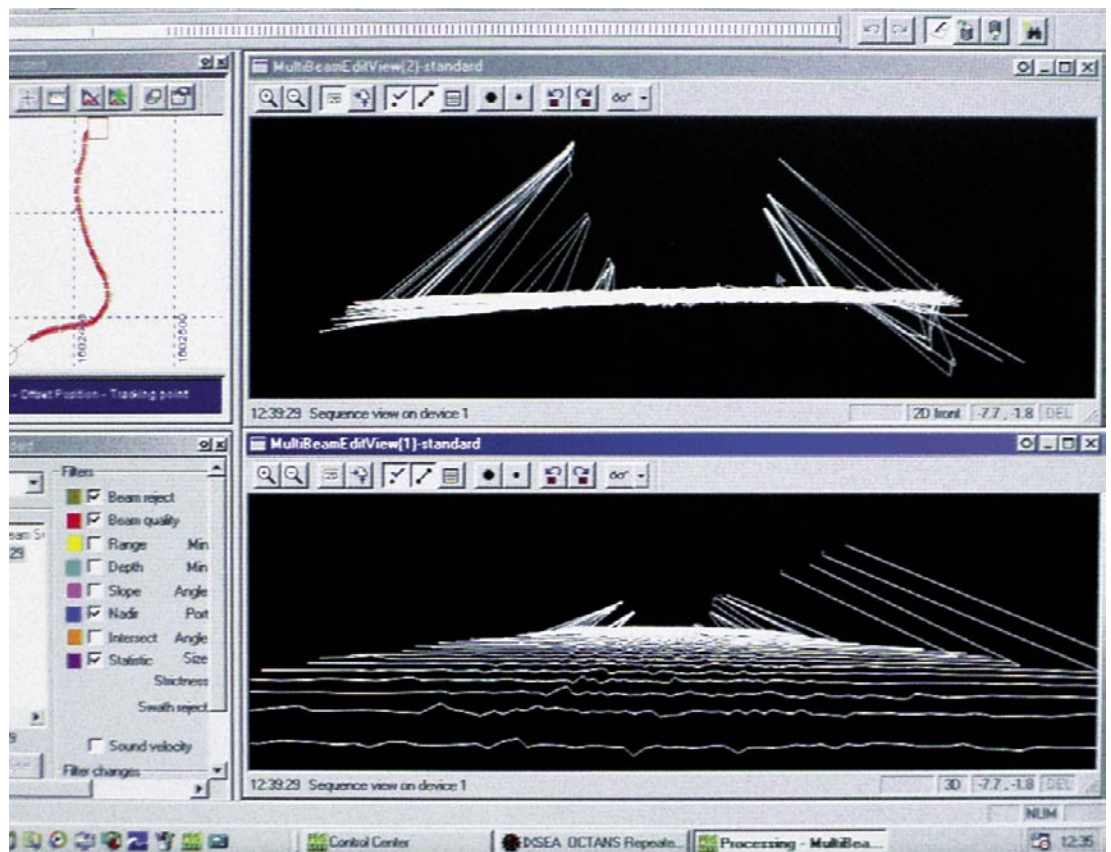


Figura 48

Esempio di filtraggio dati eseguito durante il rilievo a San Rossore

correttamente rispetto al sistema di riferimento utilizzato per eseguire i rilievi.

Ciò comporta che per poter funzionare adeguatamente, un sistema *multibeam* necessita dei seguenti strumenti di misura:

- sistema di posizionamento GPS differenziale;
- girobussola;
- sensore di moto;
- sonda di velocità del suono in acqua.

Il sistema di posizionamento è necessario per poter georeferenziare ogni singola distanza misurata dai *beams* di cui è composto il trasduttore; la girobussola fornirà l'informazione riguardante l'orientamento del fascio del *multibeam*, il sensore di moto correggerà i movimenti del trasduttore relativi al moto ondoso, al rollio ed al beccheggio dell'imbarcazione, ed infine la sonda di velocità del suono fornirà il giusto valore di propagazione acustica lungo tutta la colonna d'acqua.

I dati misurati dai singoli strumenti sono gestiti da un sistema di navigazione ed acquisizione che provvederà ad associare ad ogni distanza misurata dal trasduttore una terna corretta di valori X, Y e Z nel sistema di riferimento utilizzato.

I dati ottenuti sono trasferiti ad un PC per il processo che comporta quanto segue (Matsumoto et

al, 2001):

- compensazione dei sensori di moto e latenza di tempo (*patch test*);
- correzione della velocità del suono e della marea;
- identificazione e rimozione del rumore (Fig. 48);
- considerazioni sulla distribuzione degli ostacoli e bassi fondali;
- selezione del suono.

Il criterio di acquisizione dati *multibeam* si basa sulla copertura totale di un'area da indagare. Fondamentalmente tanti più dati verranno rilevati sulla superficie di quest'area tanto più dettagliata sarà la definizione della morfologia del fondale.

A tale scopo, prima di eseguire i rilievi, viene definita la cosiddetta "maglia di acquisizione", che verrà ad essere costituita da tante piccole celle di una determinata ampiezza (es. 1x1 m o 0.5x0.5 m) a seconda del grado di risoluzione desiderato. Durante l'acquisizione, ogni volta che il sistema rileverà delle profondità all'interno di quelle celle provvederà ad eseguire la media di tutte le misure effettuate ed a fornire la profondità media per quella unità di superficie. Al termine del processo tutta l'area indagata sarà uniformemente coperta

da una densità di punti tale da definire con un alto grado di dettaglio la batimetria della zona.

Uno degli svantaggi di questo sistema è la scarsa operatività nei bassi fondali. In generale esso può operare in acque profonde da un minimo di 1.5-2 metri in poi. Un altro problema è la falsa rifrazione indotta dalla presenza di pendii laterali estremamente ripidi (Piccin et al, 2002).

Vale inoltre la pena di citare la tecnologia GeoSwath. Si tratta di uno strumento disponibile solo recentemente sul mercato specialmente in Italia, costituito da un interferometrico multiraggio per il rilievo a larga fascia completamente integrato, adatto al rilievo di bassi fondali, ed economicamente vantaggioso. Il GeoSwath è un *sonar* progettato per fornire una alta risoluzione di rilievo. Usa la tecnologia di misura di fase (interferometrica) che offre il vantaggio di coprire un'ampia fascia di fondale (10-30 volte la profondità) con una notevole risoluzione attraverso un sistema compatto, adatto per operare in bassi fondali, laddove, come abbiamo visto, i sistemi *multibeam* hanno particolari problemi. Inoltre tale sistema offre il vantaggio di poter acquisire dati tipo "*sidescan sonar*" di ottima qualità.

Per il progetto Beachmed, nel periodo dicembre 2003-gennaio 2004, è stato effettuato un rilievo in un tratto di costa di 6 km dalla foce del Fiume Arno fino a quella del Fiume Morto fino alla batimetria 10 m. È stato inoltre rilevato il fondale antistante una spiaggia in ghiaia posta a sud dell'abitato di Marina di Pisa. In contemporanea, come descritto nel precedente paragrafo, è stato eseguito un rilievo *singlebeam*. L'imbarcazione utilizzata per il rilievo è una "Yeanneau Merry Fischer 625" (Fig. 49).

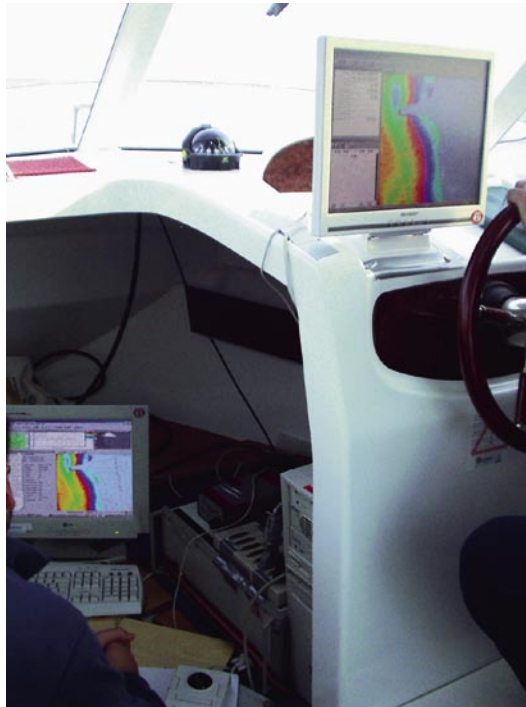
L'imbarcazione era equipaggiata con unità di posizionamento e navigazione con software PDS 2000 (Fig. 50), DGPS, sensore di moto iXsea "Octans", unità di calibrazione per la velocità del suono, sonda CTD Hydrolab Datasonde 4 ed unità Multibeam modello Reson 8101. Per il rilievo batimetrico si è utilizzata una versione evoluta, in termini di ampiezza di *swath*/spazzata, del sistema 8101 standard della Reson. Questo strumento, operante a 240 kHz, garantisce un rilievo di massima accuratezza, in linea teorica, da 0.5 metri fino a 300 metri di profondità di fondale. Il sistema SeaBat 8101ES (Fig. 47) utilizza 101 *beams*/fasci spazati di 1.5° tra loro. Il settore d'indagine del trasduttore è di 150° con una ampiezza lineare di *swath* superiore a 7 volte la profondità. Questo sistema raggiunge l'accuratezza di 2.5-3.0 cm.

Grazie alla elevata frequenza di ripetizione degli impulsi emessi, lo strumento è in grado di effettuare rilievi ad oltre 11 nodi di velocità mantenendo un dato di qualità ottimale. Ciò consente di effettuare 40 profili completi per secondo e mantenendo una copertura del fondale pari al 100%.



Imbarcazione utilizzata per il rilievo Multibeam della costa pisana. Si nota sulla sinistra il palo del trasduttore

Figura 49



Unità di posizionamento sull'imbarcazione con software PDS2000

Figura 50

Nel febbraio 2004 sono stati eseguiti ulteriori rilievi all'Isola d'Elba, nei Golfi di Procchio, Spartaia e Sant'Andrea, ed ulteriori test sono in corso di svolgimento. Tutti i rilievi sono stati effettuati in contemporaneità anche con metodologia *singlebeam* al fine di poter verificare le singole precisioni e potenzialità di utilizzo.

Si è anche valutata la possibilità di impiego del sistema Geoswath, la cui operatività è stata analizzata durante un test svoltosi nel Golfo di La Spezia. Il sistema utilizzato era un Swathplus (234 kHz) della SEA Ltd. Il rilievo è avvenuto con una imbarcazione "Blue Dream" equipaggiata anche con DGPS e sensore di moto Coda Octopus F180.

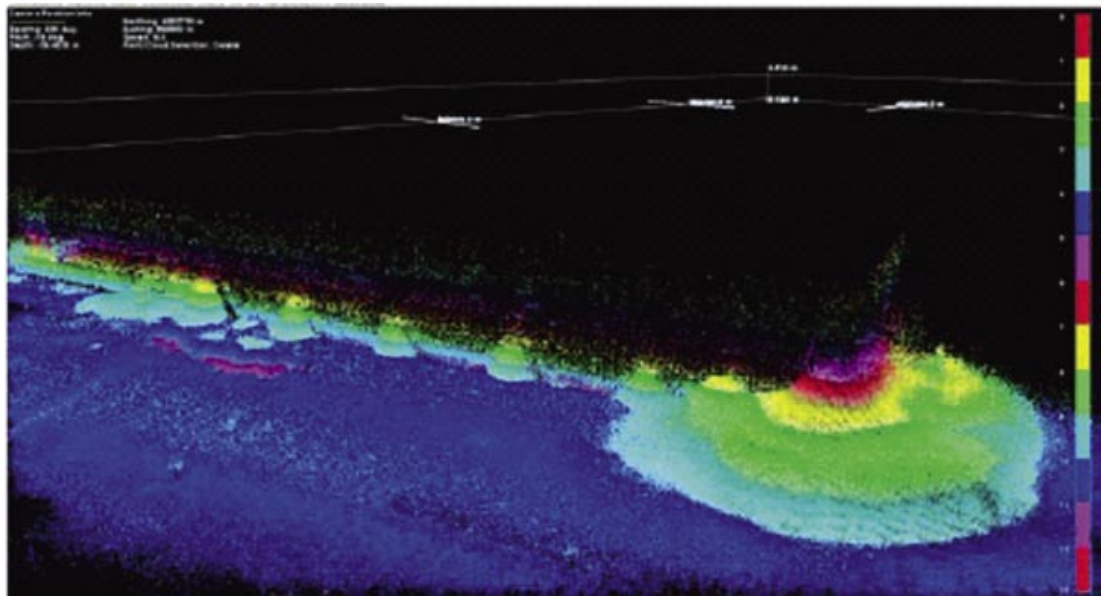


Figura 51

Esempio di restituzione dei dati acquisiti con il Swathplus in prossimità della diga foranea del porto di La Spezia

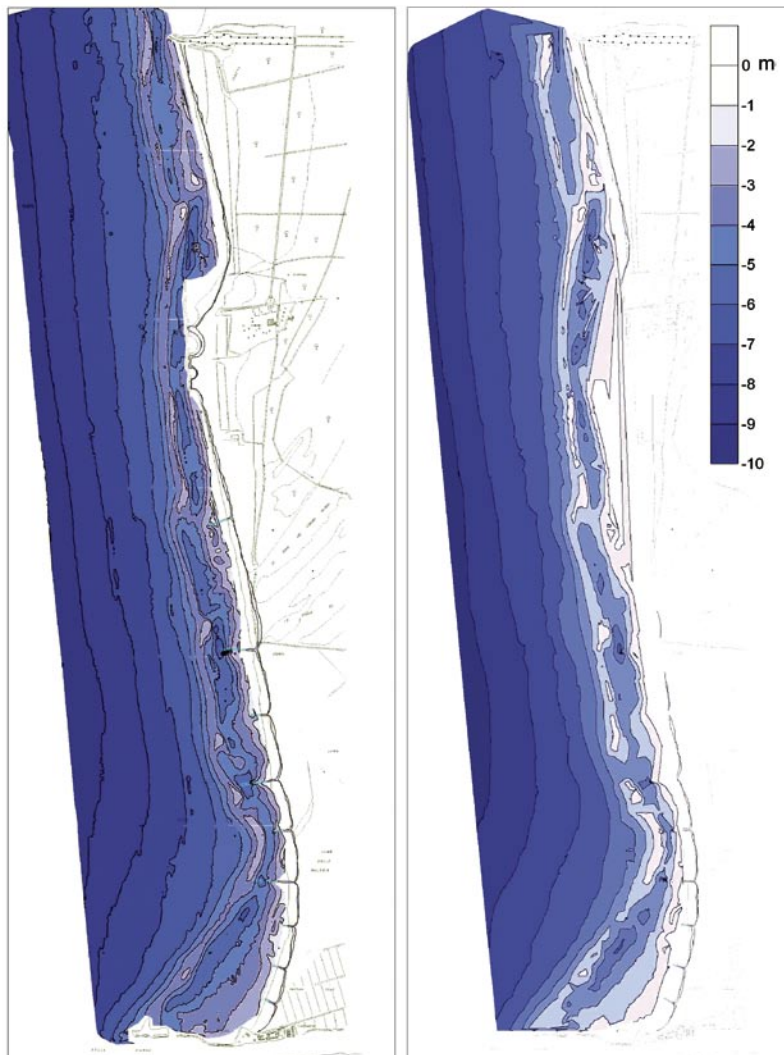
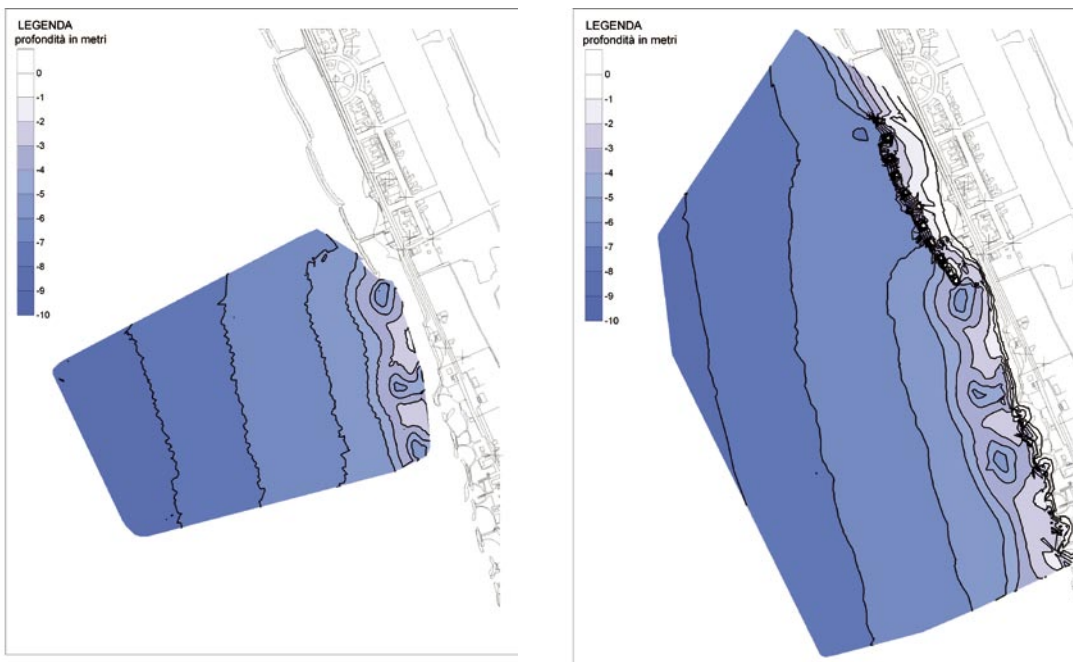


Figura 52

Carta batimetrica ottenuta con i dati provenienti da acquisizione multibeam (a sinistra) e con acquisizione singlebeam (a destra) nell'area test di San Rossore



Carta batimetrica ottenuta con i dati provenienti da acquisizione multibeam (a sinistra) e con acquisizione singlebeam (a destra) nell'area test di Marina di Pisa

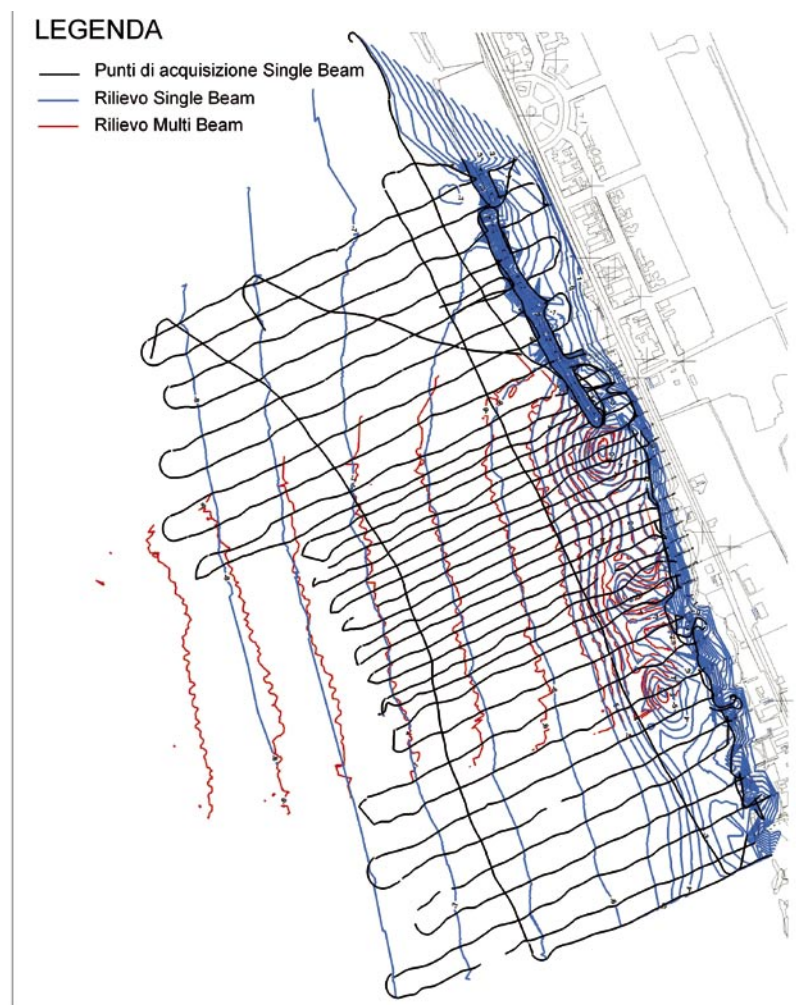
Figura 53

Il rilievo è avvenuto nella parte orientale del porto ed in prossimità di alcune scogliere. I primi risultati (Fig. 51), come da aspettative, confermano la validità di questa tecnologia in termini di accuratezza e copertura laterale.

Viene di seguito riportato il risultato delle prime elaborazioni sul confronto effettuato fra rilievi *singlebeam* e *multibeam* nelle zone oggetto di rilievo contemporaneo.

Le immagini di Figura 52 mostrano una restituzione dei due rilievi con isobate ogni metro. Come accennato, uno dei limiti del *multibeam* è il non poter operare in bassi fondali. Le due carte infatti, per problemi di confrontabilità, iniziano da In Figura 54 si può notare come l'andamento delle isobate risulti simile nel basso fondale mentre a profondità maggiori si nota uno sfalsamento fra i due rilievi. Questo potrebbe essere dovuto ad una minima differenza nelle quote rilevate che accentua lo sfalsamento sul piano a pendenza minore o ad un errore della strumentazione che si accentua con la profondità. La disomogeneità delle quote può essere stata causata ad una diversa correzione dei dati di marea fra i due rilievi e forse alla precisione intrinseca del sistema. L'andamento simile delle isobate indica comunque che un corretta spaziatura delle linee di rilievo *singlebeam* permette di ottenere un risultato equiparabile a quello del rilievo *multibeam*.

Le Figure 55 e 56 mostrano le carte delle differenze altimetriche fra i due rilievi. Le carte sono state ottenute attraverso una elaborazione in Surfer 8.0 eseguendo un'operazione di sottrazione di quote nei punti di griglia, fra i dati rilevati in acquisi-



Confronto dell'andamento delle isobate dedotte dai due rilievi a Marina di Pisa

Figura 54

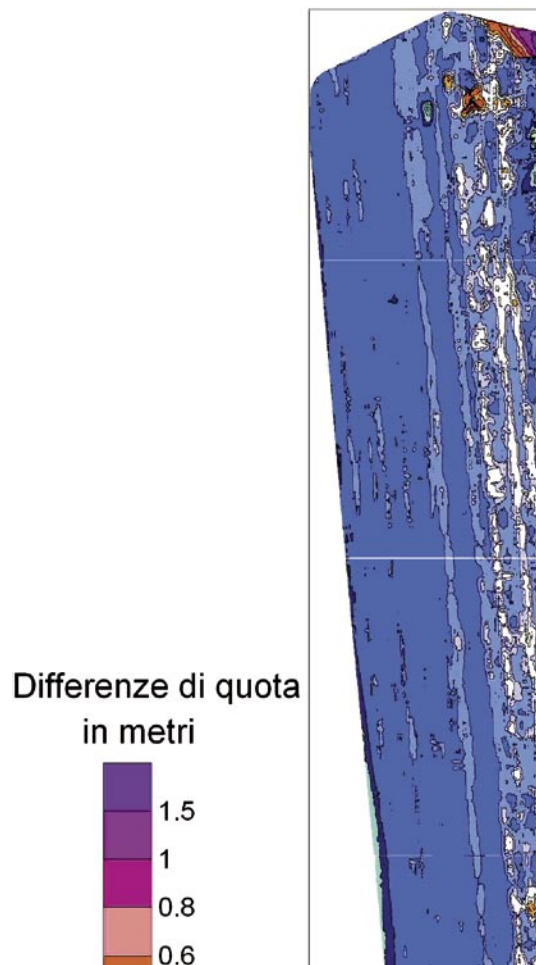


Figura 55

Carta delle differenze altimetriche fra singlebeam e multibeam a San Rossore

zione *multibeam* e quelli rilevati in acquisizione *singlebeam*.

In questo caso sono più evidenti le differenze fra le due metodologie. Anche se in molte zone la differenza è contenuta all'interno dei 10 cm, ordine di errore intrinseco nell'accuratezza della strumentazione, risulta evidente come l'interpolazione delle linee di rilievo (equidistanti dai 100 ai 50 metri) ottenuta dal *singlebeam* non possa sempre identificare le minime variazioni morfologiche rilevate dal *multibeam*. Questo risulta più evidente in aree con morfologia più contrastata come potrebbe ad esempio essere un fondale roccioso. La differenza non costante fra i due rilievi può essere in parte dovuta alla non esatta contemporaneità delle acquisizioni. I due rilievi del tratto meridionale sono sfasati di alcuni giorni ed è probabile che parte delle differenze sia dovuta alle variazioni morfologiche intervenute, come è evidente nella zona delle barre.

La differenza di volume fra i due rilievi calcolata in un tratto della spiaggia di Marina di Pisa, su una superficie di circa due milioni di metri quadri, è risultata di 1750 m³, anche se probabilmente l'errore reale è assai superiore dato che le differenze di segno opposto tendono ad annullarsi vicendevolmente.

Rilievo con Lidar marino (ALB)

L'*Airborne Laser Bathymetry (ALB)* è una tecnica che consente di effettuare rilievi batimetrici a bas-

LEGENDA

differenze di quota in metri

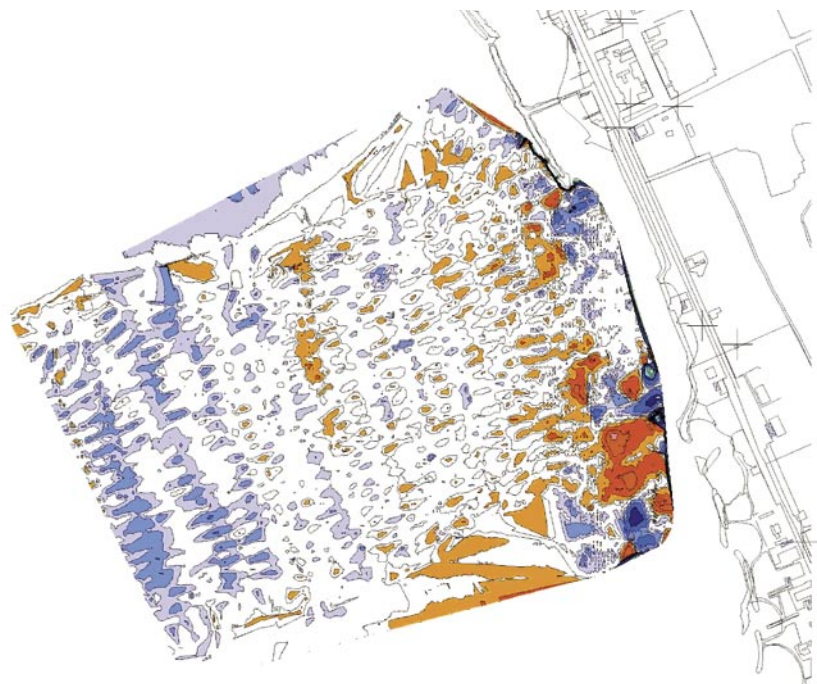
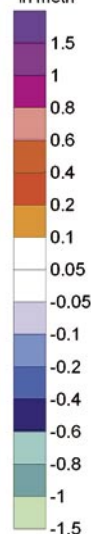
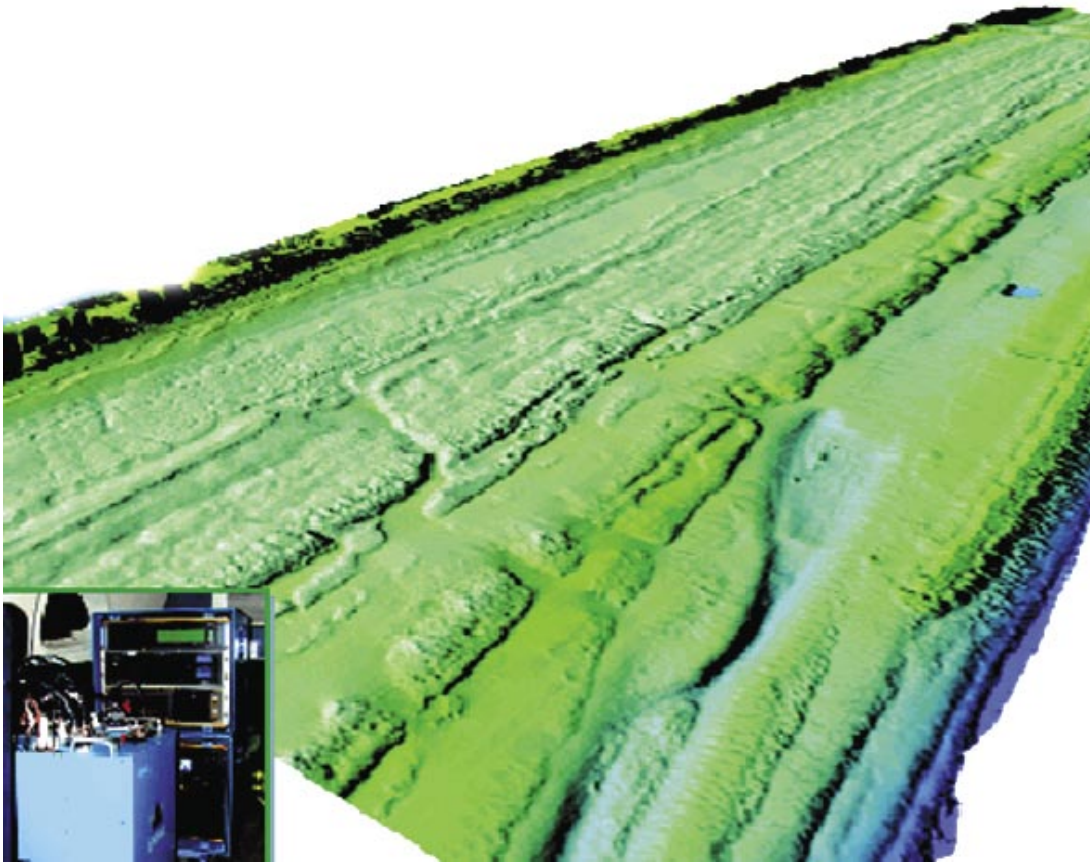


Figura 56

Carta delle differenze altimetriche fra singlebeam e multibeam a Marina di Pisa



Rilievo di spiaggia emersa e sommersa eseguito con ALB (Florida, US), in basso a sinistra è visibile la strumentazione SHOALS 1000 della Optech

Figura 57

sa profondità usando impulsi laser trasmessi da un apparecchiatura avio-trasportata.

Questa tecnologia è nata negli stati uniti per scopi militari (ricerca di sottomarini) negli anni Sessanta. Negli anni Novanta il sistema è divenuto operativo in ambito commerciale negli Stati Uniti (SHOALS), in Australia (LADS-LADSII) ed in Svezia (Hawk Eye).

Il sistema, a seconda della tipologia, può essere montato o su piccoli aerei o su elicottero.

Le principali ragioni per l'utilizzo di questa tecnica sono la possibilità di:

- eseguire rilievi in tempi rapidi anche in ampie aree;
- effettuare rilievi in zone dove la metodologie tradizionali potrebbero essere difficoltose da applicare o pericolose;
- eseguire contemporaneamente rilievi del fondale e della zona emersa come anche le strutture costiere.

Il Lidar marino è particolarmente adatto in rilievi di bassa profondità. Uno dei vantaggi è la possibilità di poter rilevare simultaneamente la parte emersa e quella sommersa della spiaggia, anche a

basse profondità dove sistemi come il *multibeam* non possono operare. Questa tecnica utilizza due impulsi laser, uno verde ed un infrarosso. Il primo penetra attraverso l'acqua per la sua particolare frequenza, mentre il secondo viene riflesso dalla superficie del mare e dalla spiaggia emersa. La profondità dell'acqua è derivata dalla differenza di tempo di ritorno fra il segnale riflesso dalla superficie marina e quello riflesso dal fondale. Si tratta di una apparecchiatura complessa, che varia leggermente a seconda delle case costruttrici, in generale costituita da un trasmettitore laser che può generare fino a 1000 impulsi al secondo, da alcuni ricevitori del segnale di ritorno, da un GPS differenziale per seguire la rotta impostata, da una tecnologia GPS per il "real time" e "post-flight data processing", da un insieme di sensori per le correzioni automatiche di rollio e beccheggio e da un sistema inerziale.

L'altezza di volo è compresa fra i 200-5000 metri. La massima inclinazione dello scanner laser è di circa 20° con una fascia di indagine pari a circa la metà della quota di volo. I rilievi generalmente avvengono con una densità di un punto ogni 16 m², ma può essere raggiunta anche una densità maggiore, con coperture areali di circa 60 km²/

ora.

I dati, una volta raccolti e processati anche da particolari algoritmi per la correzione delle fluttuazioni della superficie e delle proprietà ottiche dell'acqua, vengono elaborati e restituiti secondo le metodologie tradizionali (Fig. 57).

La limitazione principale di questo sistema è la scarsa penetrazione in acque non estremamente limpide e con bassa riflettività del fondale. In generale possiamo dire che la profondità massima raggiungibile è pari a 2-3 volte quella di "Secchi". In termini più specifici la profondità massima rilevabile è data da n/K , dove n è una costante che varia da 3 a 5 a seconda che sia giorno o notte, mentre K è un fattore esponenziale per il quale il vettore della irradianza della luce incidente decresce con la profondità.

Il raggio laser in acqua viene disperso oltre che dalle onde anche dalla presenza di materiale organico ed inorganico. In acque caraibiche di notte sono stati raggiunti i 70 metri di profondità.

La precisione verticale potenzialmente raggiungibile dall'ALB è di ± 15 cm; che rientra nello standard generalmente accettato per i rilievi idrografici e stabilito dall'International Hydrographic Organization (IHO). In maniera semplificata l'accuratezza verticale per rilievi idrografici a bassa

profondità è di ± 25 cm (1σ). Possiamo dire che tutti i sistemi ALB esistenti hanno potenzialmente una accuratezza maggiore.

Una nuova funzionalità del sistema SHOALS 1000 permette di avere immagini di pseudo-riflettanza del fondale utili per la sua caratterizzazione.

Per il progetto Beachmed, nell'ottobre 2003, è stata svolta un test con la società australiana Tenix LadsII per effettuare il rilievo della spiaggia emersa e sommersa tra la foce del Fiume Arno fino a quella del Fiume Morto. In Italia infatti non esistono allo stato attuale ditte in possesso di tale tecnologia.

Precedente al volo è stata fatta una campagna in mare per verificare la torbidità delle acque con il disco Secchi. I risultati sono stati negativi e tali da non poter effettuare la scansione. È stato fatto comunque un tentativo di rilievo nelle acque antistanti Massa, dove è presente una maggiore trasparenza delle acque, ma la strumentazione non è stata in grado di acquisire dei dati utilizzabili.

È in corso un'analisi dei dati disponibili di torbidità delle acque delle coste toscane al fine di valutare le effettive possibilità di utilizzazione di questa metodologia, che risulta comunque estremamente costosa.

Bibliografia

AMINTI P. *et al.*, *Il calcolo dei volumi dei solidi sommersi per una corretta progettazione del rilievo batimetrico*, in «Bollettino SIFET», 4 (1997)

AMINTI P. *et al.*, *L'accuratezza dei rilievi batimetrici per il monitoraggio del volume di spiaggia*, "Studi Costieri", 1 (1999)

AMINTI P. *et al.*, *Impiego della scansione laser nel rilievo dei volumi emersi delle spiagge e delle scogliere. Note preliminari*, in «Bollettino SIFET», 4 (2002)

BAILY B. *et al.*, *Comparative assessment of analytical and digital photogrammetric methods in the construction of DEMs of geomorphological forms*, in «Earth surface Processes and Landforms», 28 (2002)

BRASINGTON J. *et al.*, *Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey*, in «Earth surface Processes and Landforms», 25 (2000)

CASELLA V. *et al.*, *Estrazione del DTM di precisione dell'argine di un fiume: fotogrammetria analitica, fotogrammetria digitale e laser scanning a confronto*. Atti 6a conferenza ASITA, s.l., 2002

CHARLTON M.F. *et al.*, *Application of airborne LIDAR in river environments: the river Coquet, UK*, in «Earth surface Processes and Landforms»,

28 (2003)

CICIN-SAIN B., *Integrated Coastal and Ocean Management. Concepts and Practices*, Island Press, Washington D.C., 1998

CLARK J.R., *Coastal Zone Management Handbook*, Lewis Publisher, CRC, Boca Rota Florida, 1996

DEAN R.G., *Beach nourishment. Theory and practice*. Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 18, World Scientific, New Jersey, 2002

FRENCH J.R., *Airborne LIDAR in support of geomorphological and hydraulic modelling*, in «Earth surface Processes and Landforms», 28 (2002)

GIBEAUT J.C. *et al.*, *Increasing the accuracy and resolution for coastal bathymetric surveys*, s.l., 1998

GOMARASCA M.A., *Introduzione a telerilevamento e GIS per la gestione delle risorse agricole e ambientali*, in «AIT», 1997

HANCOCK G. *et al.*, *The production of digital elevation models for experimental model landscapes*, in «Earth surface Processes and Landforms», 26 (2001)

HENRY J.B. *et al.*, *The use of small format and low altitude aerial photos for the realization of high resolution DEMs in mountainous areas: application to the super-size earthflow (France)*, in «Earth surface Processes and Landforms», 27 (2002)

HUISING E.J. *et al.*, *Errors and accuracy estimates*

of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications, in «Elsevier-Photogrammetry and Remote Sensing. Journal of coastal research», 14/3 (1998)

JUDGE E.K. *et al.*, *Remote sensing of Barrier Island morphology: evaluation of photogrammetry-derived Digital Terrain Models*, in «Journal of coastal research», 17 (2001)

MASO M., *Misure laserscanning e batimetria mul-*

tibeam sull'asta principale del fiume Brenta. Atti 6a conferenza ASITA, (2002)

MATSUMOTO *et al.*, *Shallow water multibeam echosounding in Japan Hydrographic department*, in F.I.G. International conference, 2001

PICCIN A. *et al.*, *Aquisizione e trattamento di dati morfobatimetrici ad alta risoluzione nel bacino del lago Sebino (Lombardia)*, Atti 6a conferenza ASITA, s.l., 2002

