

Rilievi batimetrici per il monitoraggio del volume di spiaggia

Paolo Aminti e Pierluigi Aminti

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Firenze
Via S. Marta 3, 50139 Firenze, Italia

Riassunto

Lo studio affronta il problema della precisione dei rilievi batimetrici in relazione al calcolo del volume di una spiaggia sommersa, definito come il solido compreso tra la superficie del fondo marino e un piano di riferimento di quota assegnata.

Ipotizzando che il rilievo sia organizzato per sezioni parallele, si espongono i risultati di una ricerca sperimentale tesa a chiarire l'influenza della spaziatura tra le sezioni nella precisione di determinazione del volume e si analizzano le varie cause di errore nei rilievi cercando di fornire orientamenti coerenti per la corretta progettazione delle campagne di misure batimetriche. Vengono anche evidenziati i limiti di precisione nella valutazione dei volumi per il monitoraggio di ripascimenti artificiali.

Introduzione

Il monitoraggio di spiagge ricostruite mediante ripascimento artificiale si basa sul controllo sia dell'evoluzione della linea di riva sia del volume del materiale della spiaggia. Errori sistematici dell'ordine di pochi centimetri possono portare ad errori nel calcolo dei volumi dello stesso ordine di grandezza delle variazioni attese (Davis, 1991); anche errori di posizionamento planimetrico su spiagge dove sono presenti barre, possono portare ad errori elevati nel calcolo dei volumi (Dally, 1993).

La necessità di prevedere l'evoluzione di interventi di ripascimento artificiale ha indotto a sviluppare ricerche per ottimizzare le tecniche di rilievo (Esteban et al., 1995) o comunque a valutare i possibili errori nel calcolo dei volumi (Kana e Andrassy, 1996; Gambolati e Galeati, 1990; Serra et al., 1994).

Nel presente lavoro, in cui è stato preso in esame un rilievo di spiaggia eseguito con un alto livello di precisione seguendo la più diffusa metodologia di rilievo per sezioni parallele ed equispaziate, si intende evidenziare quale sia l'influenza della distanza fra le sezioni di misura (che nel seguito verranno chiamate profili) nella precisione della determinazione del volume di spiaggia.

Allo scopo è stato preso in esame il rilievo di un tratto di spiaggia con sabbia e ghiaia nella parte emersa e con sabbia media e fine nella parte sommersa; la pendenza media risulta pari a circa il 2%. Il profilo presenta una modesta barra, discontinua, alla profondità di circa 2 m mentre dalla profondità di 3 m risulta molto regolare fino al limite esterno del rilievo fissato a -6 m. Inoltre, per evitare risultati falsamente confortanti, l'analisi sperimentale è stata limitata ai soli dati compresi tra -3 m e +1.5 m, ovvero alla fascia dove sono state osservate le massime variazioni di area tra sezioni consecutive.

Previsione dell'errore dovuto all'irregolarità della superficie del fondo

Nel caso in cui la superficie del fondo marino sia stata rilevata mediante profili tra loro paralleli ed equispaziati di una quantità x [m], è possibile calcolare le superfici (A) delimitate dalle sezioni (solitamente nei tratti compresi tra 2 linee di livello) e da una linea orizzontale posta a una quota di riferimento prefissata (Fig.1); il volume del fondale (o della spiaggia o di ambedue congiunti) rispetto al piano orizzontale pertanto risulterà determinato con la formula delle sezioni ragguagliate:

$$V = \frac{1}{2} \sum_1^n (A_i + A_{i+1}) \cdot x \quad \text{con } i = 1 \div n + 1 \quad [1]$$

dove A_i è la superficie della sezione i -esima. Questa formula fornisce risultati precisi se le variazioni delle aree A_i negli intervalli x possono essere considerate lineari.

Se la spaziatura x si incrementa, la determinazione del volume risulterà ovviamente meno precisa; tale imprecisione è funzione dell'irregolarità della superficie rilevata, ovvero della variabilità delle superfici A_i tra le diverse sezioni che risulterà tanto più marcata quanto più il fondo si discosta da una superficie cilindrica. Infatti, le irregolarità locali della superficie, sia lungo il profilo che in senso ortogonale (circa parallelo alla riva), danno luogo a variazioni non lineari di volume introducendo nel calcolo effettuato con le [1] errori caratterizzati da una alternanza casuale di segno. La cumula-zione dei loro contributi si traduce in un errore sul volume totale che, in prima approssimazione, si può stimare con la legge di propagazione quadratica di Gauss.

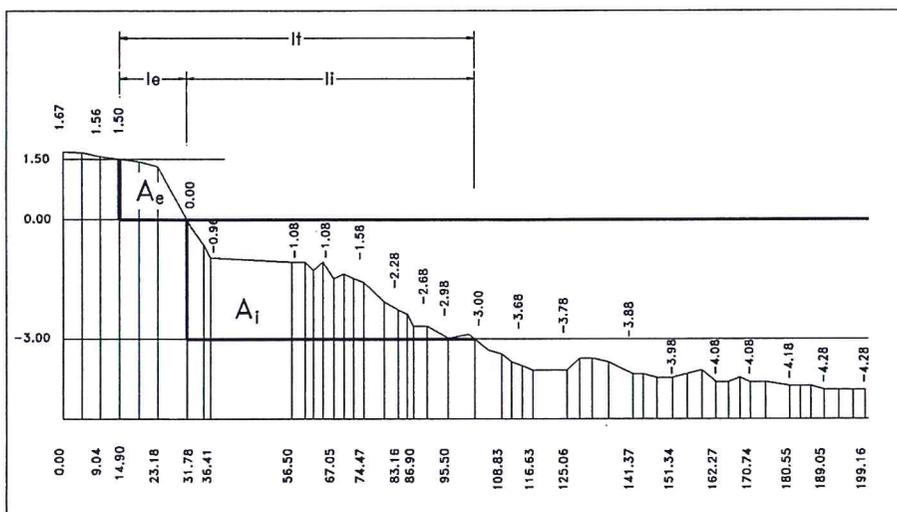


Figura 1 - Profilo della spiaggia e del fondale.

Un parametro importante per valutare tale variabilità, che si può ricavare immediatamente dai dati del rilievo, è μ_A , varianza delle A_i rispetto al valore medio A_m . Tale dato viene calcolato come:

$$\mu_A = \sqrt{\frac{\sum (A_i - A_m)^2}{n}} \quad \text{con } i = i \div n + 1 \quad \text{dove } A_m = \frac{\sum A_i}{n} \quad [2]$$

Un altro parametro importante per valutare, almeno in prima approssimazione, l'errore compiuto nel calcolo del volume del solido compreso tra la superficie rilevata e il piano di riferimento, è lo scarto quadratico medio del valore medio A_m , calcolato come

$$\mu_{AM} = \frac{\mu_A}{\sqrt{n+1}} \quad [3]$$

che esprime l'errore commesso nel considerare esatto il valore medio A_m .

Il volume, calcolato con le [1] potrebbe essere allora determinato anche più semplicemente come

$$V = L \cdot A_m \quad [4]$$

sostanzialmente equivalente alla [1], dove $L = n \cdot x$ rappresenta la lunghezza del tratto di riva considerato.

In tal caso, per quanto sopra esposto, l'errore sul volume, indicato come m_v , può essere quindi determinato come:

$$\mu_v = \mu_{AM} \cdot L \quad [5]$$

Questa impostazione semplificata fornisce una indicazione assai grossolana sulla entità della precisione conseguita, inoltre, la [5] non evidenzia la variabilità della precisione ottenuta nel calcolo del volume in funzione del valore della spaziatura x ; le verifiche sperimentali confermano comunque l'ordine di grandezza ottenuto.

Si può ritenere che ogni termine A_i che compare nella sommatoria [1] sia affetto da un errore m_A , per cui l'errore sul volume compreso tra la sezione i -esima e la successiva potrà essere espresso con la:

$$\mu'_{v1} = \frac{\mu_A}{\sqrt{2}} \cdot x \quad [6]$$

e quindi l'errore complessivo sul volume, per la cumulazione quadratica di n errori uguali, risulterà:

$$\mu'_v = \mu'_{v1} \cdot \sqrt{n} = \frac{\mu_A}{\sqrt{2}} \cdot x \cdot \sqrt{n} = \frac{\mu_A}{\sqrt{2}} \cdot x \cdot \sqrt{\frac{L}{x}} = \sqrt{\frac{L}{2}} \cdot \mu_A \cdot \sqrt{x} \quad [7]$$

I risultati conseguiti possono adattarsi con buona approssimazione a distribuzioni casuali delle superfici ovvero a scostamenti casuali dalla forma cilindrica del fondo. Se infatti le aree A_i si susseguono in modo casuale, la relazione è confermata dai dati sperimentali, mentre se le variazioni sono legate tra loro da sequenze di periodo più ampio dell'intervallo x , come nel caso di una certa concitività del fondo, si ha una chiara sovrastima dell'errore. Ciò risulta evidente tenendo conto che in ciascun addendo della [1] si utilizza, per il calcolo dei volumi, il valore medio locale dell'area A e quindi gli errori previsti non possono essere riferiti a un unico valore medio generale.

Quantificare per via teorica quale sia l'incremento di precisione conseguito utilizzando un numero crescente di valori A_i (riducendo cioè la distanza x tra le sezioni), non è immediato. In base ai dati sperimentali e a considerazioni qualitative si è avanzata l'ipotesi che l'errore commesso nella valutazione del volume compreso tra due sezioni consecutive, possa essere considerato, se m è il numero delle sezioni rilevate in un tratto di 1Km di spiaggia, come la parte m -esima dell'errore m'_v espresso dalla [7]. In prima approssimazione si può ipotizzare che dire che, avendo iperdeterminato m volte il calcolo del volume, l'errore totale sul volume, o anche ciascun errore m'_{v1} [6], può essere diviso per la radice di m .

Si pone cioè:

$$\mu''_{v1} = \frac{\mu'_v}{m} = \frac{\mu'_{v1}}{\sqrt{m}} = \frac{\mu_A \cdot x}{\sqrt{2m}} \quad [8a]$$

oppure, dato che $m = L/x$

$$\mu''_{v1} = \frac{\mu_A \cdot x^{3/2}}{\sqrt{2L}} \quad [8b]$$

L'errore commesso nel calcolo del volume globale sulla lunghezza di riva L di 1Km, risulterà allora:

$$\mu''_v = \mu''_{v1} \cdot \sqrt{m} = \frac{\mu_A}{\sqrt{2}} \cdot x \quad [9]$$

Un ulteriore parametro per la verifica sperimentale dell'errore indotto dalle variazioni morfologiche della superficie è l'errore medio [mm] per unità di superficie il cui calcolo, in prima approssimazione, può essere condotto con la:

$$\mu_r = \frac{\mu''_{v1}}{S} = \frac{\mu''_{v1}}{x \cdot l} \quad [10]$$

dove l è la lunghezza media dei profili.

Utilizzando il valore medio di l si introduce un errore ulteriore che nella fase del calcolo sperimentale è stato eliminato impiegando per ciascun intervallo tra le sezioni la superficie in pianta effettiva, calcolata come $S_i = (l_i + l_{i+1}) \cdot x/2$.

Verifica sperimentale delle differenze di volume in funzione della spaziatura tra i profili batimetrici

Per la sperimentazione delle relazioni esposte nel paragrafo precedente è stato preso in esame un tratto di spiaggia in località Cecina Mare ; in questa zona infatti era disponibile un rilievo batimetrico e della spiaggia costituito da oltre 70 profili e condotto per sezioni parallele in gran parte equispaziate tra loro di circa 17 m (Fig. 2).

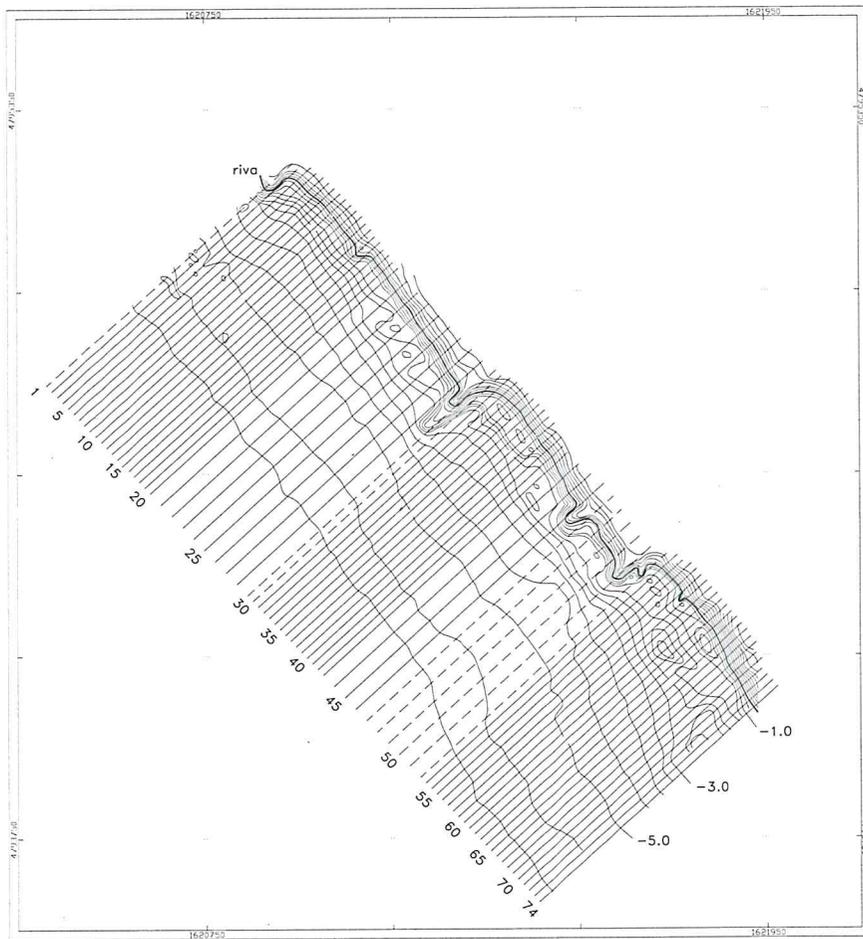


Figura 2 - Pianta del rilievo batimetrico in località Marina di Cecina.

Sono state escluse dallo studio le sezioni (tratteggiate in Figura 2) rilevate in coincidenza con punti singolari, costituiti da pennelli artificiali posti in opera per contenere il materiale di ripascimento della spiaggia e sono state considerate le rimanenti sezioni, in numero di 61, come equidistanti tra loro con una spaziatura fittizia di 16.67 m, in modo da coprire un tratto di spiaggia di 1000 m esatti. Per esaminare separatamente i contributi di errore forniti dalle porzioni emersa e sommersa della superficie, i calcoli sono stati condotti in modo separato, delimitando la zona emersa tra la linea di

riva (quota $z=0$) e la linea di livello posta a $z = +1.5\text{m}$ e quella immersa tra la riva stessa e la quota $Z = -3.0\text{m}$; inoltre è stato eseguito il calcolo complessivo del volume rilevato e quello delle superfici planimetriche S_i delimitate dalle diverse sezioni. Il valore delle aree delle sezioni verticali e quello dei volumi, eseguito considerando la equidistanza di 16.67m (60 sezioni / km) è stato poi preso come base di confronto con quelli ottenuti per intervalli crescenti tra le sezioni, in base multipla di 16.67 m :

$$1 \text{ sezione ogni } 2 \text{ rilevate} \Rightarrow x = 16.67 \cdot 2 = 33.33 \text{ m (30 sezioni/Km)}$$

$$1 \text{ sezione ogni } 3 \text{ rilevate} \Rightarrow x = 16.67 \cdot 3 = 50.00 \text{ m (20 sezioni /km)}$$

$$1 \text{ sezione ogni } 4 \text{ rilevate} \Rightarrow x = 16.67 \cdot 4 = 66.67 \text{ m (15 sezioni /km)}$$

$$1 \text{ sezione ogni } 5 \text{ rilevate} \Rightarrow x = 16.67 \cdot 5 = 83.33 \text{ m (12 sezioni /km)}$$

$$1 \text{ sezione ogni } 6 \text{ rilevate} \Rightarrow x = 16.67 \cdot 6 = 100.0 \text{ m (10 sezioni /km)}$$

Oltre al calcolo dei volumi ed ai confronti con i valori di riferimento, l'elaborazione numerica ha fornito l'entità degli errori relativi all'unità di superficie in base alle combinazioni binarie tra sezioni equispaziate in base multipla di 16.67 m , da confrontare con i risultati delle [10].

Per esempio, il calcolo del volume per $x = 33.33\text{ m}$ riguarda solo le sezioni dispari della sequenza da 1 a 61, mentre per il calcolo dei valori m_r , sono stati utilizzati anche gli intervalli tra le sezioni pari, in modo da poter mediare il risultato su una base di misure più numerosa e quindi più affidabile. Questo è risultato particolarmente vantaggioso per il calcolo degli errori nella condizione $x=100\text{ m}$, in quanto, utilizzando i soli 10 valori multipli di 6 tra 1 e 61, la limitazione numerica dei dati avrebbe reso poco significativa l'analisi dei risultati. D'altra parte l'errore considerato prescinde dalla ubicazione delle sezioni estreme all'interno della serie dei profili e la parziale sovrapposizione delle zone interessate al calcolo di m_r non frapponne quindi alcun ostacolo pregiudiziale al conseguimento di risultati corretti.

Analisi dei risultati del calcolo

Sono state adottate due quote di riferimento distinte per la parte emersa ($z_0 = 0\text{ m}$) e per quella immersa ($z_0 = -3\text{ m}$), trascurando di fatto i tratti di profilo caratterizzati da un andamento molto simile tra le diverse sezioni; la scelta di esaminare la spiaggia o il fondale fino a una maggiore profondità comporta infatti la conseguente estensione della zona di indagine lungo ciascun profilo e tale variazione porterebbe al calcolo di aree più grandi, con errori assoluti maggiori e con una variabilità assoluta (m_A) più elevata tra le sezioni consecutive.

La conseguenza di una tale scelta sarebbe quindi una amplificazione degli errori assoluti nel calcolo dei volumi [7], alla quale però corrisponderebbe una ancora più drastica (ed illusoria) riduzione degli errori relativi e per unità di superficie [10].

Oltre ai valori delle lunghezze orizzontali delle porzioni emerse, immerse e totali delle singole sezioni, sono stati calcolati i valori medi da introdurre nelle [10] e, in base ai dati di rilievo, i valori $S_i = (l_i + l_{i+1})X/2$ delle aree planimetriche interposte tra due sezioni consecutive riportati separatamente per la zona totale S_t , per la zona immersa S_i e per quella emersa S_e . Il calcolo delle A_i , aree giacenti sui piani verticali di sezione (emerse, immerse e totali) comprese tra le linee di profilo rilevate e le quote di riferimento, e quello dei volumi (parziali e progressivi), con una successiva elaborazione, ha permesso di quantificare i valori di A_m e, con le [2], quelli dei m_A .

In Tabella 1 sono riportati i valori m_{AM} , gli scarti di volume totale m_V calcolati in modo approssimato con le [5] e l'errore per unità di superficie (espresso in mm e ottenuto come m_V/S_{tot}).

I valori riportati prescindono dalla spaziatura x adottata per il calcolo dei volumi V , tuttavia, dato che gli scarti m_A e m_{AM} dipendono dal numero n di misure effettuate e che n è funzione del valore $x = 16.67\text{ m}$ assegnato, si ha quindi un legame tra i risultati e tale valore di x .

I dati sperimentali relativi a calcoli effettuati con spaziature x crescenti da 33.3 m a 100 m , mostrano una certa sovrastima dei valori m_V calcolati rispetto a quelli rilevati, plausibile anche in considera-

zione del fatto che i ΔV sono errori che cumulano l'imprecisione del calcolo effettuato impiegando l'equidistanza x considerata, con quella del rilievo di partenza ($x=16.67m$); tuttavia i valori risultano mediamente comparabili, soprattutto prendendo in considerazione le variazioni tra i valori progressivi massimi e minimi dei ΔV (Tab. 2).

Tabella 1 - Scarti delle aree A_i e dei volumi calcolati con le [5].

	zona emersa	zona immersa	zona totale
m_A	$\pm 4.92 \text{ m}^2$	$\pm 41.1 \text{ m}^2$	$\pm 40.0 \text{ m}^2$
m_{AM}	$\pm 0.64 \text{ m}^2$	$\pm 5.3 \text{ m}^2$	$\pm 5.1 \text{ m}^2$
m_V	$\pm 635 \text{ m}^3$	$\pm 5300 \text{ m}^3$	$\pm 5100 \text{ m}^3$
m_V/S_{tot}	$\pm 36 \text{ mm}$	$\pm 53 \text{ mm}$	$\pm 44 \text{ mm}$

Tabella 2 - Valori sperimentali delle differenze di volume calcolate su un tratto di 1Km.

$\Delta v \text{ [m}^3\text{]}$	zona emersa	zona immersa	zona totale
/33m	-204 ÷ 343 tot. -138 m ³	-614 ÷ 776 tot. -358 m ³	-497 ÷ 610 tot. -497 m ³
/50m	-229 ÷ 1349 tot. 1349 m ³	-1379 ÷ 1563 tot. -1319 m ³	-401 ÷ 1822 tot. 30 m ³
/67m	-208 ÷ 661 tot. 331 m ³	-1227 ÷ 3064 tot. 2358 m ³	-646 ÷ 3351 tot. 2688 m ³
/83m	-1439 ÷ -121 tot. -1439	-946 ÷ 2130 tot. -946	-2385 ÷ 1322 tot. -2385
/100m	-209 ÷ 328 tot. 274 m ³	376 ÷ 4317 tot. 376 m ³	435 ÷ 4424 tot. 650 m ³

Se, per valutare l'errore nel calcolo del volume, vengono utilizzate le formule [6] e [7], i risultati ottenuti forniscono valori accettabili solo per la zona emersa (Tab. 3).

Queste formule danno risultati attendibili, anche in linea di principio, solo se la distribuzione delle A_i risulta circa casuale e se si prescinde da modi di variazione di periodo più ampio di x .

Nel nostro caso lo s.q.m. delle A_c è pari quasi al valore medio delle stesse e in Figura 3 si può osservare come tale variabilità appare distribuita tra le diverse sezioni in modo sostanzialmente casuale.

Tabella 3 - Stima dell'errore complessivo sul volume calcolato con la [7].

$m'_V \text{ [m}^3\text{]}$	zona emersa	zona immersa	zona totale
/16m	± 450	± 3700	± 3600
/33m	± 630	± 5300	± 5100
/50m	± 780	± 6400	± 6200
/67m	± 900	± 7500	± 7300
/83m	± 1000	± 8800	± 8600
/100m	± 1100	± 9000	± 8800

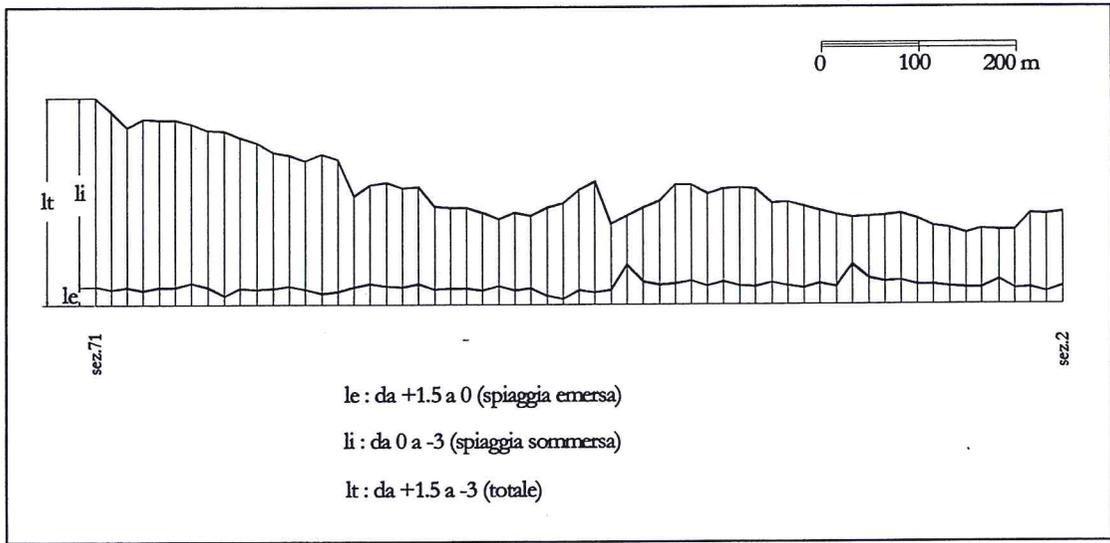


Figura 3 - Variazione delle distanze tra le linee di livello.

Se infine si impiegano, per la previsione dell'errore ΔV le formule [8] e [9], si ottengono risultati (Tab. 4) abbastanza prossimi ai dati sperimentali proprio per la zona immersa e maggiormente per quella totale; le variazioni della zona emersa vengono invece per lo più compensate da variazioni di segno opposto del volume immerso. Nelle Figure 4, 5, 6, inoltre, sono riportati i grafici di previsione dei risultati ed i valori sperimentali.

E' stato poi calcolato, solo per la zona totale, l'errore per unità di superficie al fine di confrontare i valori con i dati sperimentali. Anche in questo caso i valori teorici sono stati incrementati opportunamente (colonna 2 della Tabella 5) in modo da tener conto del fatto che quelli sperimentali sono affetti da una cumulazione di errori dovuti alla non esatta assimilabilità del valore di riferimento del volume (calcolato con $X = 16.67$ m) al valore vero.

Tabella 4 - Stime dell'errore complessivo sul volume calcolate con la [9].

m^3_v [m ³]	zona emersa	zona immersa	zona totale
/16m	±60	±500	±500
/33m	±120	±1000	±900
/50m	±180	±1500	±1400
/67m	±200	±1900	±1900
/83m	±300	±2400	±2300
/100m	±350	±2900	±2800

I valori corretti sono stati ottenuti da quelli teorici mediante la formula di Gauss che esprime la cumulazione quadratica degli errori di diversa entità:

$$\mu_r^c(x) = \pm \sqrt{\mu_r^2(x) + \mu_r^2(16.7)} \quad [11a]$$

ovvero, considerando le [10] e precedenti:

$$\mu_r^c(x) = \frac{\mu_A}{1 \cdot \sqrt{2L}} \sqrt{x + 16.7} \quad [11b]$$

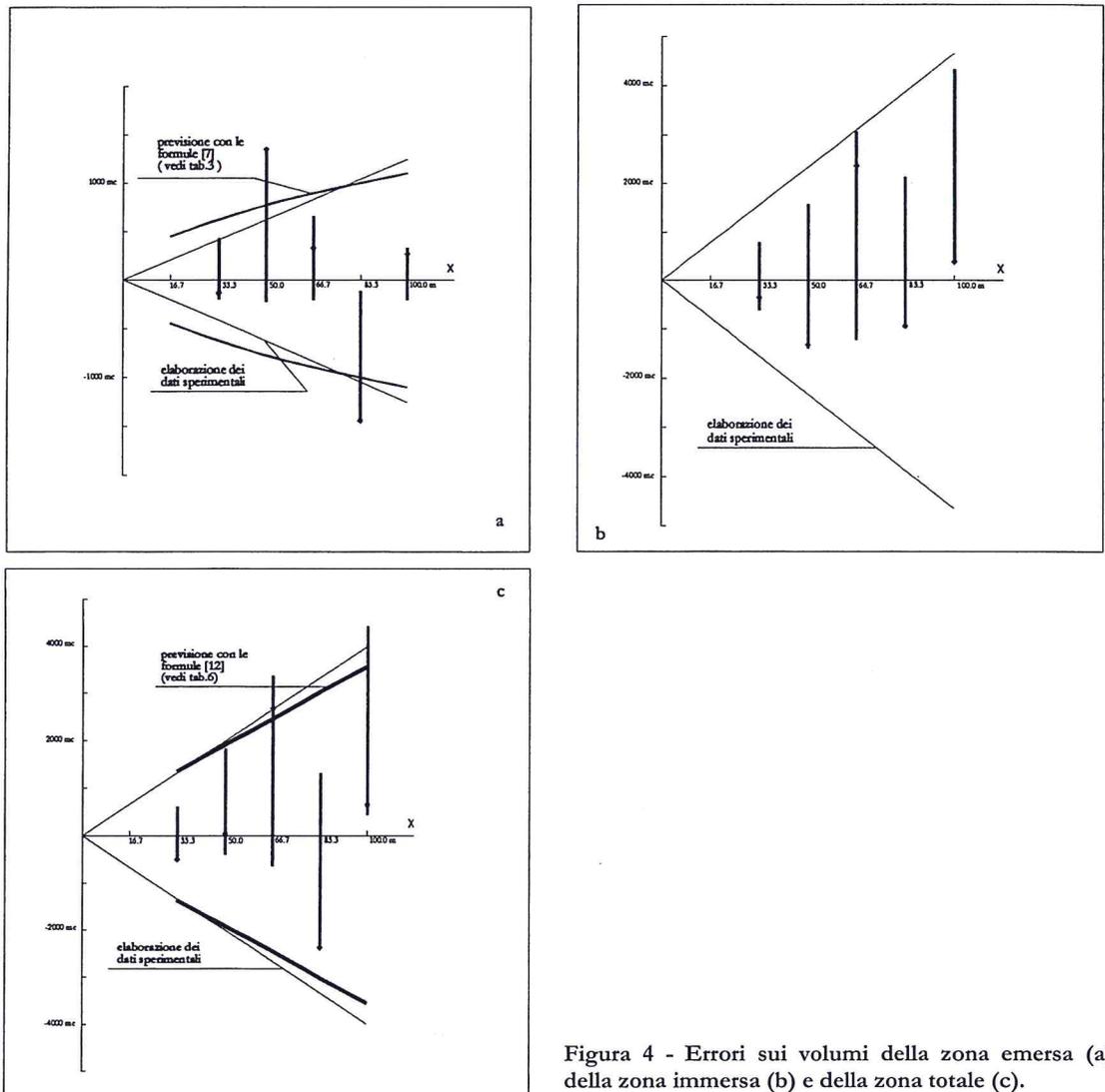


Figura 4 - Errori sui volumi della zona emersa (a), della zona immersa (b) e della zona totale (c).

Tabella 5 - Stime dell'errore per unità di superficie calcolate con le [10] e le [11]

m_r [mm/m ²]	valore teorico	teorico corretto	valore sperimentale
/16m	±36	---	---
/33m	±52	±63	±62
/50m	±64	±73	±81
/67m	±73	±81	±90
/83m	±82	±90	±94
/100m	±89	±96	±107

Almeno in parte le differenze tra i valori corretti e quelli sperimentali potrebbero essere attribuite al fatto che nel calcolo effettuato con le [10] non sono utilizzate le superfici planimetriche reali S_i , ma un valore costante $S = x \cdot l$.

Se i valori teorici di m_r , calcolati con le [5] vengono confrontati con quelli sperimentali, si evidenzia una identità con il valore relativo alla spaziatura $x = 16.67$ m, a riprova della dipendenza delle relazioni considerate dal numero n dei profili rilevati.

In conseguenza dei risultati delle verifiche condotte sui m_r corretti, è stato effettuato il calcolo di previsione dell'errore sui volumi a partire da questo parametro: Il valore della approssimazione m_v , dalle [9] e le [10], risulterà espresso come:

$$\mu_v^e = l \cdot \sqrt{L} \cdot \mu_r^e \cdot \sqrt{x} \quad [12]$$

dove l è il valore medio della lunghezza di profilo interessato dal calcolo dei volumi.

I risultati ottenuti dalla relazione [12], oltre che in Figura 6, sono stati riportati in Tabella 6 e mostrano una discreta corrispondenza con i valori sperimentali e con le loro curve interpolanti.

**Tabella 6 - Approssimazioni del volume totale calcolate con le [12].
In neretto compaiono i valori massimi delle differenze di volume.**

X	m_v [m ³]	valori sperimentali [m ³]
/33m	±1350	-497 ÷ 610 tot. -497
/50m	±1900	-401 ÷ 1822 tot. 30
/67m	±2450	-646 ÷ 3351 tot. 2688
/83m	±3000	-2385 ÷ 1322 tot. -2385
/100m	±3550	435 ÷ 4424 tot. 650

Nella Figura 7, i dati sperimentali relativi agli errori per unità di superficie sono stati interpolati con curve del secondo ordine con il metodo dei minimi quadrati, ricavando così la legge di variazione che lega m_r alla radice di x . Applicando la legge di propagazione [12], si ottengono i coefficienti angolari delle rette che esprimono la variazione dello scarto quadratico medio del volume m_v in funzione di x (Figg. 4-5-6).

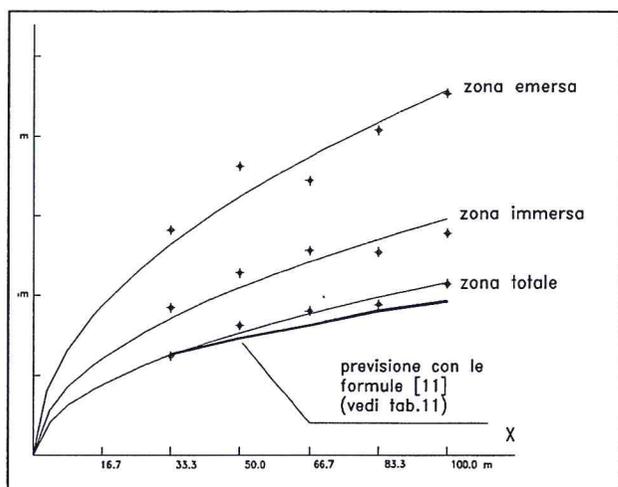


Figura 7 - Errori sui volumi per unità di superficie nelle zone considerate.

Da notare inoltre, nella stessa Figura 7, che i valori di m_r risultano molto più elevati per la zona emersa che per le altre zone e che anche lo scarto medio dei dati sperimentali dalla curva teorica è superiore di molto (± 12 mm per la zona emersa rispetto ai ± 8 mm di quella immersa e ai ± 3 mm di quella totale). Tutto ciò conferma che il volume totale beneficia di una certa compensazione degli errori casuali ma di segno prevalentemente opposto che si verificano nelle altre due zone.

In Tabella 7 sono invece riportati i valori calcolati dei coefficienti delle equazioni che approssimano i dati sperimentali.

Tabella 7 - Parametri sperimentali per la determinazione degli errori sui volumi.

	parametro a $m_r [\text{mm}] = a \sqrt{x [\text{mm}]}$	parametro m $m_v = m \cdot x$
zona emersa	0.723898	12.6
zona immersa	0.467864	46.6
zona totale	0.340924	40.0

Errore sulle coordinate dei punti del rilievo batimetrico dovuto alla metodologia ed alla attrezzatura di misurazione.

Il rilievo diretto del fondo del mare, collegato a punti a terra, viene spesso eseguito con le usuali tecniche della topografia (celerimensura), mediante spostamento di una mira lungo allineamenti prestabiliti in mare; con questo metodo si raggiungono precisioni relativamente elevate e ben quantificabili fino a profondità non superiori a qualche metro. Data la necessità di una sosta su ciascun punto rilevato, il metodo è troppo lento ed è utilizzato solo per rilievi di dimensioni piuttosto contenute. In più, data l'impossibilità di posizionare la mira su punti caratteristici delle forme di fondo, quali base o sommità di eventuali barre, in quanto di norma non visibili, quando i punti rilevati non sono sufficientemente vicini fra loro ne deriva una non corretta rappresentazione del profilo.

Fra i metodi di rilievo diretto del fondo, senza utilizzare come riferimento il livello del mare, vanno ricordati i sistemi a slitta trainata sul fondo e lo speciale veicolo CRAB (Birkemeyer e Mason, 1984, Gable e Wannetik, 1984). Risultano attualmente più diffusamente utilizzati i sistemi di rilievo indiretto o, più di frequente, sistemi misti. In questo modo la profondità del fondo rispetto al natante è determinata con ecoscandagli, mentre la posizione del natante rispetto a punti fissi a terra è determinata con strumenti topografici. E' invece di impiego più recente l'uso di sistemi GPS per la determinazione dei punti di rilievo, ma mancano finora riferimenti univoci sulla precisione, soprattutto altimetrica, ottenuta con queste metodologie (Gutierrez et al., 1996).

Per i rilievi basati sulla misura della profondità con ecoscandagli si può evidenziare come principale vantaggio la velocità di esecuzione della misura: questo permette di rilevare un profilo con un numero di punti abbastanza alto così da rappresentare in modo dettagliato anche le forme di fondo.

Se ne deduce che: la precisione altimetrica di ciascun punto appartenente a un rilievo topobatimetrico, risulta avere approssimazioni comprese tra $\pm 5 \div 10$ cm.

Precisione del rilievo del fondo non riferito topograficamente.

Le difficoltà e le possibili inesattezze dei rilievi di questo tipo sono da attribuire prevalentemente alla impossibilità pratica di riferire il livello della superficie del mare all'istante in cui viene eseguita la misura di profondità ed alla mancanza di un riferimento planimetrico certo dei punti rilevati. Quest'ultimo aspetto può essere trascurato solo per allineamenti abbastanza brevi e di direzione

controllata da terra o nel caso in cui vengano utilizzati sistemi di posizionamento planimetrico di tipo GPS, altrimenti resta fortemente dubbia l'utilità stessa del rilevamento.

Le oscillazioni della superficie del mare dovute alle maree astronomiche, sono prevedibili ed è possibile apportare le correzioni con una sufficiente precisione; è invece notevolmente più complesso tener conto delle variazioni di livello dovute alla marea meteorologica ed al sovrizzo causato dal moto ondoso.

La forza tangenziale dovuta al vento con direzione verso costa produce un incremento del livello medio così come si ha un innalzamento del livello medio a causa del moto ondoso.

Un calcolo accurato di queste variazioni richiederebbe la conoscenza del campo di vento sul mare e la misura dell'altezza e direzione delle onde e risulterebbe comunque abbastanza incerta la determinazione in condizioni non stazionarie. La precisione dei rilievi è quindi in gran parte condizionata dalla possibilità di apportare le opportune correzioni alle profondità misurate in funzione della variazione del livello del mare che può essere determinata in modo rigoroso solo se si eseguono misure continue con un mareografo appositamente installato nella zona interessata.

Considerate le cause di non stazionarietà del livello del mare e ed il tempo necessario a rilevare un profilo, risulta indispensabile la determinazione della quota di riferimento almeno all'istante iniziale e al termine del rilievo.

Possono essere quindi classificati come rilievi a «basso livello di precisione» quelli eseguiti con una misura continua della profondità senza apportare correzioni al livello di riferimento e con il controllo della posizione del natante solo agli estremi del tratto da rilevare. La posizione dei singoli punti viene determinata per interpolazione ipotizzando una velocità costante del natante.

Un più «alto livello di precisione» è garantito con un controllo della posizione del natante su alcuni punti intermedi alla linea di rilievo e con la correzione del livello di riferimento sulla base di misure eseguite su un riferimento fisso nella zona interessata.

La precisione più spinta richiede l'installazione di un registratore del livello marino e la determinazione della sua quota rispetto ad un caposaldo di livellazione (e quindi rispetto al livello medio del mare) Registrando l'ora di inizio e termine di ciascun tratto da rilevare è possibile correggere la profondità misurata dei singoli punti sulla base degli scostamenti del livello del mare durante l'esecuzione delle misure rispetto al livello di riferimento. Solo i rilievi condotti con questa tecnica permettono l'esecuzione di confronti fra misure eseguite in periodi diversi e la conseguente stima delle variazioni dei volumi di spiaggia corrispondenti.

Il sovrizzo dovuto al vento, a differenza di quanto accade per le variazioni di livello dovute alla marea astronomica o alle variazioni di pressione, non è uniforme ma è più alto in prossimità della riva. Data l'impossibilità pratica di eseguire misure lontano da riva, si possono quindi ridurre gli errori solo operando in assenza di vento o con venti deboli.

L'errore probabile sulle misure di profondità, tenendo conto anche degli errori propri di ecoscandaglio di precisione, può essere stimato in condizioni ottimali pari a circa ± 7 cm, mentre in condizioni accettabili e con normale accuratezza la precisione del rilievo è di ± 17 cm. La precisione scende ulteriormente se non vengono effettuate le correzioni per la marea o se non viene controllata periodicamente la taratura dell'ecoscandaglio.

Determinazione dell'errore sulle A_i dovuto alle incertezze del rilievo

In base a quanto esposto la precisione sulla quota dei punti appartenenti a un profilo batimetrico rilevato con metodi topo-batimetrici, non risulta generalmente superiore a ± 10 cm. Questo risultato è da assumersi come punto di partenza per le considerazioni seguenti insieme con la considerazione di un altro fattore di non secondaria importanza, la spaziatura costante dei punti nella direzione del profilo, ovvero la loro densità nell'unità di lunghezza.

Dato che gli incrementi di produttività determinati dall'impiego di ecoscandagli rendono tale metodo il più diffuso, si può pensare che, con un intervallo di acquisizione di un punto al secondo, e con una velocità del natante di circa 6 nodi, si abbia il rilievo di un punto ogni 3 m. L'errore sul calcolo

dell'area compresa tra il profilo e un livello di riferimento fissato è dato dalla cumulazione quadratica degli errori accidentali indotti in ogni tratto di 3 m, per cui si ha:

$$\mu_A^t = \mu_1[m] \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{l_i}{3}} = 0.1732 \cdot \sqrt{l_i} \quad [13a]$$

dove: μ_1 è l'errore altimetrico su ciascun punto e l_i è la lunghezza del profilo

Se invece ci sono componenti pseudo-sistematiche dell'errore di rilievo, la formula per il calcolo del conseguente errore sulle A_i diventa:

$$\mu_A^t = \pm \mu_1[m] \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{l_i}{3}} \pm \mu_2 \cdot l_i = \sqrt{3l_i \cdot \mu_1^2 + l_i^2 \cdot \mu_2^2} \quad [13b]$$

dove μ_2 è la componente pseudo-sistematica dell'errore sulla quota dei punti rilevati.

Determinazione della precisione necessaria in funzione della spaziatura dei profili.

Sulla base dei risultati ottenuti è possibile tentare una sintesi tendente a quantificare l'errore complessivo sul calcolo del volume di un solido compreso tra la superficie del fondo marino ed una quota di riferimento, in funzione degli errori dovuti sia al rilievo, che alla spaziatura dei profili.

Per rilievi topo-batimetrici riferiti a punti a terra, e quindi con trascurabili componenti sistematiche, può essere utilizzata la [13a]. L'errore su un'area A_i avente una lunghezza media l_m di 100 m risulterebbe avere una entità pari a $\pm 0.9 \div 1.7 \text{ m}^2$. Essendo V il volume calcolato con la [1], l'errore sarà valutabile con una formula analoga alla [7], dove m_A deve intendersi sostituito con l'errore μ_A^t dovuto alle imprecisioni del rilievo batimetrico:

$$\mu_V^t = \sqrt{\frac{L}{2}} \cdot \mu_A^t \cdot \sqrt{x} \quad [14]$$

Questo, con una spaziatura $x = 50 \text{ m}$, risulterebbe pari a $130 \div 270 \text{ m}^3$ e quindi non comparabile con il rispettivo valore di circa 1500 m^3 dovuto alle irregolarità del fondo e alla spaziatura tra i profili (Tabella 4).

Un esame degli ordini di grandezza dei m_A (tab.1) rivela l'irrilevanza dell'errore topografico (dell'ordine di $1 \text{ m}^2 - 2 \text{ m}^2$) se confrontato con quello dovuto alle irregolarità del fondo ed alla spaziatura tra i profili (41 m^2) e mette quindi in evidenza il fatto che non sia necessario ricorrere ad una formulazione che tenga conto di entrambi i fattori.

Risulta pertanto che il rilievo topo-batimetrico è circa di un ordine di grandezza più preciso di quanto la spaziatura tra i profili richieda anche nel caso di rilievi molto particolareggiati ($x = 16 \text{ m}$).

D'altra parte, con l'impiego di metodi di rilievo batimetrico indiretti la precisione sulle quote dei punti viene limitata da errori di tipo pseudo-sistematico che, pur essendo di entità contenuta, alterano sensibilmente i risultati. Infatti, se la componente accidentale degli errori sulle quote dà contributi quantificabili con la [14] e quindi valori numerici talmente limitati da risultare trascurabili, la componente pseudo-sistematica, avendo una costanza di segno all'interno della sessione di misure, deve essere moltiplicata per l'area del rilievo. Nel caso in esame quindi si ha:

$$m_A^t = m_2 \cdot l_m \cdot L \quad [15]$$

L'entità dell'errore, per una striscia di fondale larga 100 m e lunga 1 Km, varia quindi linearmente con m_2 ; ad esempio con $m_2 = 10 \text{ cm}$, m_A risulta pari a 10000 m^3 .

E' così chiaro che, per avere errori sui volumi dovuti alla spaziatura dei profili di questa entità, è necessario superare abbondantemente gli intervalli x di 100 m; ciò rende evidente la non proponibilità dei metodi indiretti, così come sono attualmente realizzati, per la determinazione dei volumi dei fondali e delle loro variazioni.

Conclusioni

Per motivi di economia, nell'appalto dei rilievi batimetrici, si tende spesso a «diradare» i profili, senza però rinunciare ad elevate precisioni sulle quote dei punti. Da quanto esposto questa soluzione

appare immotivata, ma è altresì vero che attualmente i metodi di rilievo topo-batimetrici sono i soli in grado di fornire risultati accettabili.

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 delle variazioni di volume fra due rilievi successivi è dell'ordine di 1% - 5%. È evidenziato come errori pseudo-sistematici, dovuti alla scarsa precisione nel controllo del livello di riferimento del mare o a non perfetta taratura degli ecoscandagli, danno origine ad errori di ordine di grandezza da 2 a 5 volte maggiori rispetto a quelli dovuti al rilievo delle sezioni ed alla loro spaziatura.

Con il presente studio sono state evidenziate le interazioni tra le caratteristiche che devono essere attribuite a un rilievo perché risulti progettato correttamente, perché consenta cioè economia e precisioni adeguate. Probabilmente la risposta tecnica alle esigenze di precisione e di rapidità di esecuzione, emerse anche in questo studio, verrà dai sistemi GPS e più in particolare dal loro impiego con le metodiche cinematiche continue, in grado di fornire le coordinate dei punti con errori accidentali planimetrici e altimetrici dell'ordine del dm anche con natanti in moto relativamente rapido e di fornire un collegamento a punti fissi a terra con errori pseudo-sistematici contenuti.

Bibliografia

- Birkemeier W. A. e Mason C. (1984) - *The CRAB : a unique nearshore surveying vehicle*. ASCE Journal of Surv. Eng. 1101, pp 1-7.
- Dally W.R. (1994) - *An overview of coastal surveying technology for documenting beach-inlet interaction*. Journ. Coastal Research, 28: 291-300.
- Davis R.A.Jr. (1991) - *Performance of a beach nourishment project based on detailed multi-year monitoring*. Redington Beach, Florida. Coastal Sediment 1991, ASCE, pp 2101-2115.
- Esteban V., Aguilar J., Serra J. e Medina R. (1995) - *Levatamientos y seguimientos topo- batimetricos en ingenieria de costas*. Ingenieria del Agua, vol. 2 (Num Extraordinario), pp. 181-200.
- Gable C.G e, Wanetick J.R. (1984) - *Survey techniques used to measure nearshore profiles*. ASCE. Proc. Coastal Engineering , vol. 2, pp. 1879-1895.
- Gambolati G. e Galeati G. (1990) - *Optimal Bathymetry of tyrrhenian sea by stocastic interpolators*. Water Resources Bulletin, vol.26, n.4, pp.677-685.
- Gutierrez R., Gibeault J.C. e Morton R.A. (1996) - *Geoid variation and beach morphology :a regional approach to shoreline surveying using the Global Positioning System*. Geological Soc. of America South-central Section 28 (1) 17.
- Kana T.W. e Andrassy C.J. (1996) - *Beach profile spacing: practical guidance for monitoring nourishment projects*. Proceedings Int. Conf., Coastal Engineering , pp. 2100-2114.
- Mann D.W. (1993) - *A note on littoral budgets and sand management at inlets*. Journal of Coastal Research special issue 18, pp 301-308.
- Serra J., Esteban V., Aguilar J. e Medina R. (1994) - *La cuantificación del error del las batimetrías en el seguimiento de playas*. Ingenieria del Agua, vol. 1, pp. 7-18.
- Seymour R.J. e Bothenan D.P. (1984) - *A hydrostatic profiler for nearshore surveying*. Coastal Engineering, pp. 1-14.