

## DINAMICA COSTIERA: INCERTEZZA NELL'INDIVIDUAZIONE DELLA POSIZIONE DELLA LINEA DI RIVA

Giorgio Manno<sup>1</sup>, Carlo Lo Re<sup>1</sup>, Giuseppe Ciraolo<sup>1</sup>, Antonino Maltese<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali (DIIAA), Università degli Studi di Palermo - Viale delle Scienze, Edificio 8 Palermo  
e-mail: manno@idra.unipa.it

Riassunto - La linea di riva, ha natura dinamica, ovvero è sottoposta a continui cambiamenti, a breve e lungo termine, causati da processi geomorfologici, idrodinamici e da fattori improvvisi e rapidi. La ricerca esamina le problematiche legate all'incertezza nell'individuazione della posizione della linea di riva, al variare del tempo, considerando sia aspetti geologico - geomorfologici che aspetti idraulico marittimi. Il caso studio è un tratto di costa marsalese (Trapani). Tale settore è caratterizzato da una costa bassa con sedimenti sabbiosi d'età olocenica. L'analisi diacronica è stata basata su ortofoto e cartografie per il periodo di tempo compreso tra il 1994 e il 2006. È da precisare che la metodologia di confronto tra ortofoto e cartografie è soggetta a incertezze dovute agli errori di graficismo, alla georeferenziazione ed ai valori di marea e clima ondoso presenti al momento delle acquisizioni. Pertanto è risultato necessario, effettuare un studio idraulico marittimo di base. La massima altezza raggiunta dall'onda sulla spiaggia emersa (*run-up*) dipende dall'altezza e dalla lunghezza (o dal periodo) d'onda, oltre che dalla composizione e dimensione granulometrica del sedimento della spiaggia emersa che ne determinano la pendenza. Attraverso i risultati ottenuti, si sono potuti valutare l'incertezza e l'errore insiti nella determinazione della linea di riva, per fissate pendenze. È emerso che in molti casi non è possibile stimare avanzamenti e arretramenti della linea di riva inferiori a 10-20 m.

**Abstract** – *The shoreline has a dynamic nature and it is subjected to a constant change in the short and long period, caused by geomorphological and hydrodynamic processes, as well as by sudden and fast event. This research examines the issues related to the uncertainty to identify the shoreline position and evolution. The investigated case study is the Marsala (Trapani) coastline. It is characterized by a low coast with sandy sediments from Holocene age. The diachronic analysis was carried out with the aid of orthophotos and maps in the period ranging from 1994 to 2006. It should be noted that the comparison between orthophotos and maps is subjected to several uncertainties, due to graphics and geo-referencing errors. In order to take into account the sea fluctuations during the investigated period it was necessary to perform a maritime hydraulic study. The run-up is related to the height and length (or period) of the waves, as well as to the composition and particle size of the beach sediments, that determine the beach slope. The obtained results allowed to assess the uncertainty and consequently the errors in the evaluation of the shoreline position, for a given slopes. In particular, it was found that, in many cases, it is not possible to assess the shoreline rise and fall, for values lower than 10-15 m.*

## **Introduzione**

Uno dei problemi di maggiore rilevanza nello studio delle coste è l'erosione delle spiagge. È evidente che l'utilizzo della fascia costiera rappresenta uno dei fattori strategici che coinvolge non solo gli equilibri geomorfologici, spesso profondamente alterati, ma anche quelli ecologici, estremamente sensibili ai cambiamenti. La normale oscillazione della linea di riva è frutto della continua evoluzione del litorale. Quando la linea di riva, negli anni, arretra di parecchi metri, si parla di erosione costiera. Tutto ciò è legato alla dinamica costiera, ovvero agli effetti diretti ed indiretti di alcuni fenomeni fisici di carattere geomorfologico ed idraulico. L'osservazione e lo studio di tali fenomeni è strettamente legato alla individuazione della posizione della linea di riva in un preciso periodo temporale, quindi, deve essere la prima variabile da determinare. Risulta evidente che un errato posizionamento iniziale produce errori su tutto lo studio. Un approccio rigoroso, quindi, dovrebbe tenere conto delle incertezze legate a questa operazione.

In questo lavoro si è voluto esaminare il caso in cui si dispone di riprese aeree ripetute nell'arco di alcuni anni. La linea di riva ottenuta come intersezione tra "acqua e terra" è la linea effettiva, o essa è influenzata dal clima ondoso e dalla marea esistente al momento della ripresa? Per potere rispondere a queste domande si è voluto verificare, attraverso un caso studio, quale è l'errore introdotto da una definizione della linea di riva che non tiene conto del clima ondoso e della marea. Inoltre per determinare la zona più frequentemente bagnata dalle onde si è ritenuto opportuno valutare la "mareggiata ordinaria". Infatti è utile definire la linea di riva tenendo in considerazione che la parte della spiaggia, ricoperta dalle mareggiate più frequenti appartiene al mare piuttosto che alla terra. Quindi, a prescindere dal clima ondoso presente al momento della ripresa, si è voluto valutare la posizione della linea di riva in corrispondenza di tale mareggiata considerando la porzione di spiaggia appartenente al mare. La metodologia di studio applicata alla spiaggia Lido Signorino (Marsala), consta delle seguenti fasi:

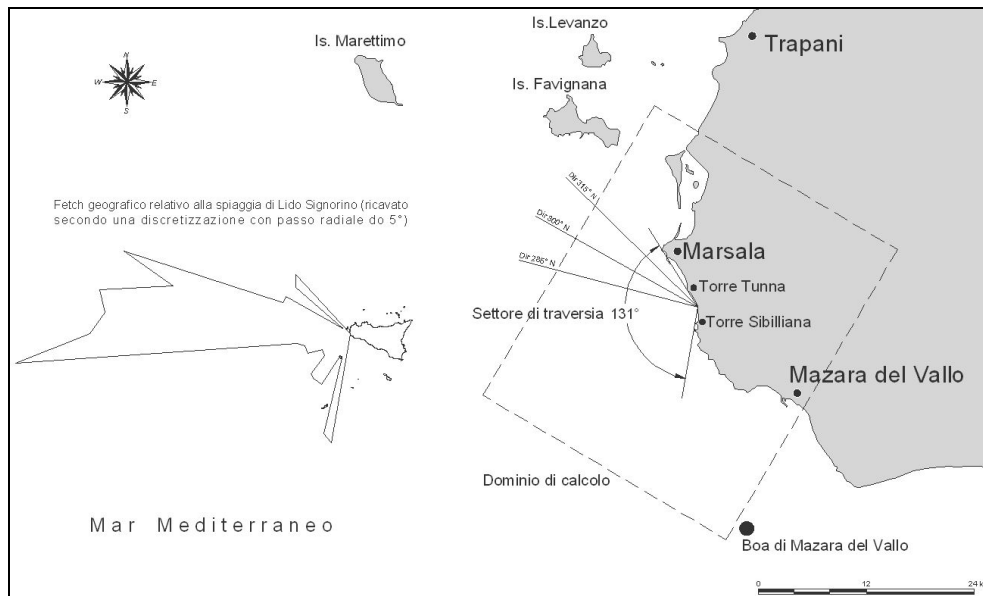
1. descrizione geologico geomorfologica del sito d'interesse. Tale fase è stata necessaria per caratterizzare la spiaggia in studio e identificare la natura dei sedimenti che costituiscono la spiaggia e stimare la pendenza media. Proprio questi ultimi, infatti, oltre ad essere soggetti all'azione erosiva ed al trasporto ad opera del mare, determinano la pendenza della spiaggia;
2. analisi diacronica della linea di riva effettuata attraverso l'uso di ortofoto per un periodo di tempo compreso tra il 1994 (le riprese sono state eseguite nel periodo compreso tra il 07-06-1994 e il 04-04-1995) e il 2006 (ripresa del 27-08-2005).
3. per ogni anno è stata individuata una linea di riva;
4. studio della mareggiata ordinaria;
5. propagazione del moto ondoso;
6. stima della massima risalita dell'onda relativo alla mareggiata ordinaria;
7. influenza della marea.

## **Lineamenti geologici della costa marsalese**

La costa marsalese appartiene geologicamente alla Pianura costiera di Marsala - Mazara del Vallo (Figura 1). La piana ha direzione di allungamento NO-SE ed è lievemente

degradante verso mare (NE-SO). Il territorio è piuttosto vasto e caratterizzato da lineamenti morfologici pressoché costanti e regolari, tipici delle ampie pianure costiere modellate e spianate dall'azione del mare nel periodo Quaternario. Tali superfici pianeggianti, soltanto nelle aree più interne lasciano il posto a morfologie di tipo collinare, ma sempre con rilievi molto modesti e con pendenze molto blande. La costa, che va da Capo Boeo (Marsala) verso Capo Feto (Mazara del Vallo), è una bassa piattaforma calcarenitica che crea un panorama ripetitivo, caratterizzato da spiagge sabbiose che si susseguono con piccoli promontori rocciosi.

In particolare la spiaggia in studio ricade tra Torre Tunna ( $37^{\circ}45'32,26''N$ ,  $12^{\circ}27'40,00''E$ ) a sud della città di Marsala e Torre Sibilliana ( $37^{\circ}43'36,31''N$ ,  $12^{\circ}28'11,23''E$ ). Le due torri delimitano la spiaggia ricadendo rispettivamente nei due promontori a nord e a sud di essa. Il tratto di costa si estende per circa 3 km assumendo la forma di mezza luna. Percorrendola dalla linea di costa verso l'interno, alle sabbie litorali, seguono, in pochissimi tratti, delle dune in passato in grado di raggiungere alcuni metri in altezza. Un esempio di sistema dunale ancora "esistente" è visibile solo in alcune zone in prossimità dell'attuale lido Delfino. La speculazione e l'abusivismo edilizio hanno portato allo spianamento delle dune, per la costruzione di edifici ad uso turistico stagionale. A sud di questa spiaggia, in corrispondenza della Caletta Sibilliana (al confine con il Comune di Petrosino), si riscontrano affioramenti rocciosi di natura calcarenitica.



**Figura 1** - Ubicazione geografica del tratto di costa d'interesse con segnato il settore di traversia, il dominio di calcolo e le direzioni del moto ondoso più critiche. *Geographic position of the studied coast. Figure shows: sea storm sector, computational domain and critical wind direction.*

La geologia dell'area in esame è rappresentata, nella sua porzione più superficiale, quasi esclusivamente dalla presenza di sedimenti costieri, di tipo calcarenitico, d'età

quaternaria, modellati dalle periodiche oscillazioni eustatiche. In particolare, nel tardo Pleistocene inferiore si sono depositati sedimenti costieri, noti come "Calcareniti di Marsala" (Emiliano II -Siciliano), disposti in discordanza sui depositi più antichi (Formazione Marnoso Arenacea della Valle del Belice del Pliocene medio -superiore).

In seguito ad una fase trasgressiva del Pleistocene medio si depose sulle Calcareniti di Marsala una placca calcarenitico-sabbiosa alla quale *Ruggieri e Unti*, (1974) diedero il nome di Grande Terrazzo Superiore (G.T.S.). Compresi tra il G.T.S. e un terrazzo attribuito al Versiliano (oggi sommerso), sono stati individuati sette ordini di terrazzi [5], che sono stati classificati in funzione della loro quota (dal più antico al più recente: 3 m, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 75 m, 100 m e G.T.S.). Associate alle evidenze precedentemente descritte, sono state rilevate alcune strutture morfologiche (barre, dune) ad andamento parallelo alla costa che confermano e marcano alcuni momenti di formazione di questi terrazzi [5]. Nella costa in esame, in prossimità di Torre Sibilliana, affiora il terrazzo di quota 3 metri con calcareniti attribuibili al Tirreniano.

La spiaggia è costituita da sabbie molto fini con rari (Torre Sibilliana) accenni di diagenesi [5]. Per quanto riguarda le caratteristiche granulometriche i grani hanno dimensioni comprese fra il decimo di millimetro ed il millimetro con una prevalente presenza di grani di dimensione prossima al millimetro. Con buona approssimazione il materiale può ritenersi monogranulare. La sabbia è probabilmente il prodotto di fenomeni di frantumazione di bioclasti.

## **Analisi diacronica**

Per ricostruire con precisione le variazioni lineari e areali della costa marsalese avvenute negli ultimi quattordici anni, è stato realizzato un modello di analisi vettoriale su base informatizzata in ambito GIS che ha previsto l'utilizzo di ortofoto per un periodo compreso tra il 1994 e il 2006. Le ortofoto utilizzate, sono tutte nel sistema di riferimento UTM-WGS84-33N e in particolare si tratta: 1) volo Italia 1994 in scala di grigio e risoluzione spaziale nominale,  $R_s$ , pari a 1 m, 2) Volo IT 2000 a colori e  $R_s = 1$  m ed infine 3) il volo IT 2006 a colori e  $R_s = 0,5$  m.

Si sottolinea che a causa della disomogeneità della risoluzione spaziale delle immagini telerilevate, e delle oggettive difficoltà nella corretta digitalizzazione della linea di riva, questa può essere soggetta a piccoli errori di accuratezza planimetrica. Per l'area oggetto di studio, si ritiene che il margine di errore per ogni linea di costa sia contenuta entro i 5 metri. Le immagini sono state georiferite e per ognuna di esse sono stati individuati un numero di punti di controllo, uniformemente distribuiti, mediamente compreso fra 6 e 10.

Le immagini georiferite sono state usate per costruire fotomosaici estesi a tutto il litorale, oggetto di analisi, per ogni anno di ripresa aerea. Le immagini sono state georiferite e per ognuna di esse sono stati individuati un numero di punti di controllo, uniformemente distribuiti, mediamente compreso fra 6 e 10. Le immagini georiferite sono state usate per costruire fotomosaici estesi a tutto il litorale oggetto di analisi, per ogni anno di ripresa aerea.

## Studio idraulico marittimo

La dinamica costiera è governata dagli effetti diretti ed indiretti di alcuni fenomeni fisici di carattere idraulico. I cosiddetti parametri idraulico-marittimi che rivestono interesse sono: le onde, le correnti e le escursioni di livello. Di fatto per la metodologia proposta [3], l'analisi del moto ondoso rappresenta il punto base per un migliore dettaglio. Preliminarmente all'analisi del moto ondoso occorre eseguire un'analisi dell'esposizione geografica del tratto costiero in esame. Nel caso in studio il settore di traversia ha un'ampiezza di  $131^\circ$  con onde che possono provenire dalle direzioni comprese tra  $195^\circ$  e  $315^\circ$  N. Quest'ultima direzione è stata esclusa a causa della presenza delle Isole Egadi, pertanto l'intervallo risulta essere  $195^\circ$  e  $300^\circ$  N (vedi Figura 1).

Identificato il settore di traversia, sono stati acquisiti i dati ondametrici, ricavati per il tratto di costa considerato, dalla boa di Mazara del Vallo appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (RON). La boa è ancorata a SO del porto di Mazara del Vallo e le sue coordinate sono: latitudine  $37^\circ 31' 00''$ N, longitudine  $12^\circ 32' 00''$ E [1]. La boa registra gli spostamenti verticali con intervallo di  $\mp 20$  m (risoluzione 1 cm con un'accuratezza del 3%) e direzioni di provenienza con intervallo di  $0^\circ \div 360^\circ$  (risoluzione  $1,5^\circ$  con un'accuratezza  $0,5^\circ \div 2^\circ$ ). Questa boa è l'unica presente nei pressi dell'area oggetto di indagini ed è gestita attualmente dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), i dati sono forniti dallo stesso ente. Si sono potuti acquisire i dati relativi: alle altezze d'onda significative, ( $H_s$  [m]), ai periodi d'onda di picco e medi ( $T_p$  e  $T_m$  [s]) e direzione media di provenienza del moto ondoso ( $D_m$  [ $^\circ$ N]) per un intervallo di tempo compreso tra il 01 luglio 1989 ed il 04 aprile 2008. I dati ondametrici hanno permesso, attraverso uno studio di propagazione dell'onda da largo sotto costa, di valutare l'entità di risalita delle onde sulla spiaggia emersa consentendo una stima sulla posizione della linea di riva. Tra tutte le direzioni si è scelto di effettuare lo studio della linea di riva soltanto per onde provenienti dalla direzione  $285^\circ$  N, poiché da essa provengono le più frequenti mareggiate e le altezze di picco maggiori. Tra tutti i valori di picco di mareggiata relativi alla direzione  $285^\circ$  N il minimo si è verificato nel 1989 ( $H = 3,2$  m), a cui è associato un periodo  $T = 7,60$  s. Questi valori, così ricavati, sono serviti per applicare il modello di propagazione delle onde (SWAN).

## Il modello SWAN

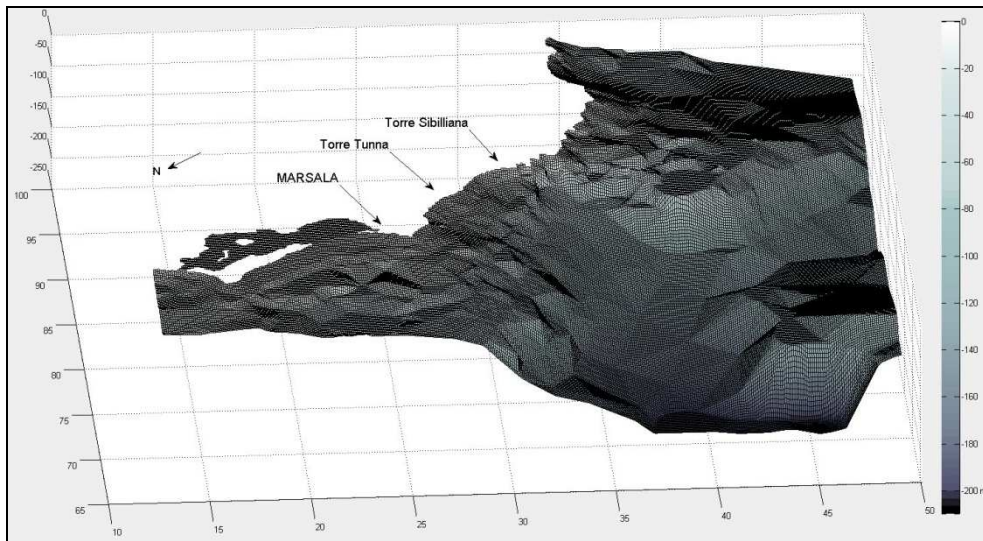
SWAN è un modello d'onda di terza generazione, ed è utilizzato per ottenere stime accurate dei parametri d'onda in laghi, estuari e zone costiere note: la batimetria, il clima ondoso al contorno e le condizioni iniziali di vento. Questo modello sviluppato dal Delft University si basa sull'equazione di bilancio energetico dello spettro [10].

Le celerità di propagazione delle onde sono ottenute attraverso la teoria lineare come in *Whitham* (1974), *Mei* (1983). Il modello si basa sul principio che tutte le informazioni sulla superficie del mare si possono calcolare a partire dalla varianza spettrale d'onda  $E(\sigma, \theta)$  ovvero dalla distribuzione di energia del moto ondoso sulle frequenze angolari  $\sigma$  e sulle direzioni di propagazione  $\theta$ . Il modello determina l'evoluzione delle onde attraverso la variazione dell'azione di densità  $N(|\vec{x}|, t; \sigma, \theta)$  nello spazio  $\vec{x}$ , e nel tempo  $t$ .

Dove con azione di densità si intende il rapporto tra la varianza spettrale e la frequenza angolare ( $N = E/\sigma$ ). La variazione dell'azione di densità  $N$  è regolata dalla seguente equazione di bilancio (Mei, 1983; Komen et al., 1994):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U}) \cdot N] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad 1$$

Il lato sinistro rappresenta la parte cinematica dell'equazione in cui il secondo termine indica la propagazione di energia delle onde nelle due dimensioni geografiche ( $x$ ), con la celerità di gruppo  $\vec{c}_g = \partial \sigma / \partial \vec{k}$  derivata dalla relazione di dispersione lineare  $\sigma^2 = g |\vec{k}| \cdot \tanh(|\vec{k}| d)$ ,  $\vec{k}$  vettore di numero d'onda,  $d$  profondità locale.

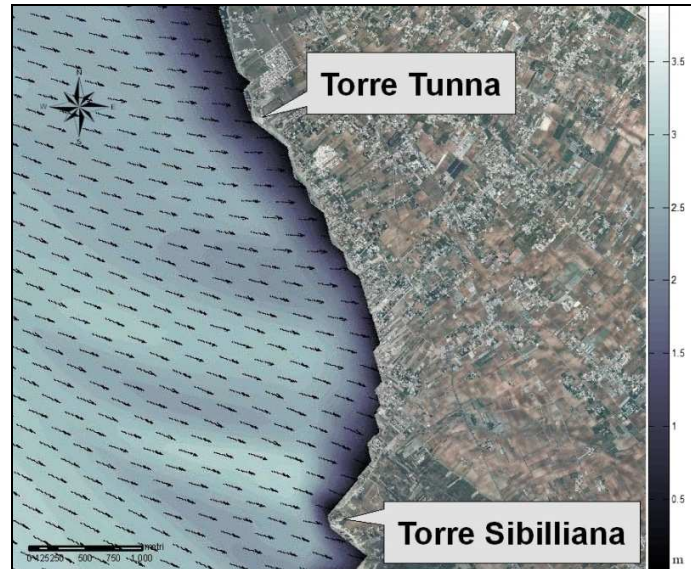


**Figura 2** – Dominio di calcolo a maglia rettangolare con passo di 250m. *Computational domain with rectangular mesh and spatial step of 250m*

Il terzo termine rappresenta l'effetto di traslazione della frequenza angolare a causa della variazione di profondità e della presenza delle correnti. Il quarto termine rappresenta l'effetto di rifrazione indotto sempre dalla variazione di profondità e dalla presenza delle correnti. Le grandezze  $c_\sigma$  e  $c_\theta$  sono le celerità di propagazione nello spazio spettrale ( $\sigma$ ,  $\theta$ ). Il lato destro dell'equazione contiene il termine sorgente,  $S_{tot}$ , che rappresenta tutti i processi fisici che generano, dissipano, o ridistribuiscono l'energia delle onde. In questo lavoro tra i termini sorgente vi è inserito anche il termine dissipativo di frangimento. È stata usata una griglia di calcolo a maglia quadrata e passo di 100 m e nelle simulazioni effettuate non si è tenuto conto dell'azione del vento. Sono state utilizzate altezze significative delle onde di ingresso pari a 3,20 m, con un periodo di 7,60 s e

direzione di propagazione 285° N.

I risultati di una delle simulazioni effettuate sono stati riportati nella Figura 2. Attraverso l'analisi di tali risultati si sono ricavate l'altezza significativa  $H_s = 3,11$  m e il periodo  $T = 6,58$  s, relativi alla batimetria 60 m. In seguito questi dati sono serviti per il calcolo del *run-up* come specificato nel seguente paragrafo.



**Figura 3** – Il modello SWAN applicato alla costa marsalese, tra Torre Tunna e Torre Sibilliana. Le frecce indicano la direzione di propagazione dell'onda, mentre la scala dei colori le altezze d'onda significative [m]. *SWAN model applied to the Marsala coast, between Tunna Tower and Sibilliana Tower. Arrows indicate the direction of wave propagation whereas grayscale colors indicates the significant wave height*

Una volta ricostruita la propagazione del moto ondoso al largo si vuole quantificare la massima risalita dell'onda sulla spiaggia. Il *run-up* è stato calcolato attraverso l'uso di una formula empirica proposta da [6]. Questa formula è utilizzabile per spiagge naturali, sabbiose e con inclinazione  $\beta_f = 1,5^\circ \div 10,8^\circ$  e diametro medio delle particelle sabbiose  $d = 0,18 \div 0,8$  mm. La sua espressione è la seguente:

$$R = c \cdot L_{zwm} \quad [\text{m}] \quad 2$$

Dove  $c = 0,89$  e  $L_{zwm} = 0,6(H_{orms}L_0)^{0,5} \tan\beta_f$  se  $\tan\beta_f \geq 0,1$ ;  
mentre  $L_{zwm} = 0,6(H_{orms}L_0)^{0,5}$  se  $\tan\beta_f < 0,1$

In cui si è indicato con:  $L_{zwm}$  la scala verticale per i valori di Rayleigh del *run-up* (Nielsen e Hanslow, 1991);  $H_{orms}$  il valore quadratico medio delle altezze d'onda a largo appartenenti alla mareggiata;  $L_0$  la lunghezza d'onda a largo calcolata con la nota

espressione  $L_0 = gT^2/2\pi$ , valida su acque profonde come nel caso in esame, in cui il periodo  $T$  è stato assunto pari al valore medio registrato durante la mareggiata. Nel caso in studio, assumendo una pendenza media della spiaggia pari a  $\tan \beta_f = 0,0359$ , avendo assunto  $H_{orms} = 2,19$  m, la massima risalita dell'onda risulta pari a 15,88 m. Nell'analizzare il risultato ottenuto è opportuno puntualizzare che la formula adottata fornisce un valore di *run-up* approssimato per eccesso, come peraltro riportato in letteratura e che nel futuro si prevede di utilizzare un modello di *run-up* più sofisticato.

## Conclusioni

La nuova metodologia proposta, sebbene in fase preliminare, riesce a valutare l'influenza del clima ondoso e delle maree nell'individuazione della posizione della linea di riva su immagini telerilevate. Esse sono infatti molto spesso gli unici elementi cartografici disponibili della spiaggia, e quindi gli unici elementi sui quali è possibile basare la ricostruzione storica dell'evoluzione morfologica del litorale.

Il caso in studio ha mostrato come il moto ondoso associato alle caratteristiche mareali del sito produce un errore nel posizionamento della linea di riva dell'ordine di 15 m. Si sono in questo modo delimitate delle aree aventi come limiti sia la linea di riva ricavata dalla ortofoto, sia il *run-up* calcolato. Tali fasce sono strettamente legate a mareggiate ordinarie perché al verificarsi di esse sono sommerse dall'acqua. In questi termini queste aree dovrebbero essere trattate come fasce di rispetto e vincolate anche in termini di demanio marittimo. I limiti della metodologia sono strettamente legati alla qualità dei dati ottenuti attraverso i rilievi in situ e dalla disponibilità di dati di boa a largo.

## Bibliografia

- [1] *Atlante delle onde nei mari italiani*, APAT, Marzo 2006
- [2] Baldock T.E., Weir F. and Hughes M.G. *Morphodynamic evolution of a coastal lagoon entrance during swash overwash*, *Geomorphology* 95, Issues 3-4, 15 March 2008, pp 398-411.
- [3] Boccotti P. *Idraulica Marittima*, UTET 2008.
- [4] *Coastal Engineering Manual*, Engineers, U.S.A., Department of the Army, Washington, 2002
- [5] D'Angelo U. & Vernuccio S. I terrazzi marini quaternari dell'estremità occidentale della Sicilia. *Mem. Soc. Geol. It.*, LI, 1996, pp. 585-594.
- [6] Neilsen, P., & D. J. Hanslow, *Wave run-up distributions on natural beaches*, *J. Coastal Res.*, 7, 1991, pp. 1139-1152.
- [7] Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A., Sallenger Jr A.H. *Empirical parameterization of setup, swash and run-up*, *Coastal Engineering* 53 (7) (2006), pp. 573-588
- [8] Tomasicchio U. *Manuale di Ingegneria portuale e costiera* BIOS 2001.
- [9] Whitham, G.B., *Linear and Nonlinear Waves*. John Wiley and Sons Inc., NY. (1974)
- [10] Zijlema, M., 2010, *Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids*, *Coastal Engineering*, 57, 267-277.