

MONITORAGGIO DELLA DINAMICA COSTIERA NELLA RADA DI BOSCA MARINA (SARDEGNA OCCIDENTALE): RISULTATI E TENDENZE EVOLUTIVE DELLA SPIAGGIA EMERSA E SOMMERSA

Maurizio Costa¹, Roberto Ledda², Arturo Lebani³, Enrico Maria Paliaga⁴, Antonio Pitzalis²
¹ CRITERIA srl – Città_Ricerche_TERritorio_Innovazione_Ambiente, via Cugia 14 - 09129 Cagliari, tel. 070 303583, fax 070 301180, e-mail: m.costa@criteriaweb.com

² CRITERIA srl, Cagliari

³ Libero Professionista, Roma

⁴ Libero Professionista, Cabras (OR)

Riassunto – Il presente lavoro espone le esperienze condotte ed i risultati raggiunti nell'ambito delle attività di monitoraggio ambientale *ante* e *post-operam* dell'intervento "Consolidamento dei versanti e messa in sicurezza dei tratti stradale e ferroviario tra Bosa Marina e Turas". Il monitoraggio è stato eseguito con il rilevamento topografico e batimetrico della spiaggia emersa e sommersa e con la misurazione dei parametri correntometrici, ondametrici e torbidimetrici all'interno della baia di Bosa.

L'analisi e l'elaborazione dei dati raccolti ha permesso di studiare la morfodinamica della spiaggia e di interpretare le tendenze evolutive del sistema sabbioso a seguito della realizzazione degli interventi progettuali.

Abstract – *This present paper includes the experiences and results achieved by the environmental monitoring before and after the project of the "Consolidation of the slopes and safety of the road and railway between Bosa Marina and Turas". The monitoring was performed with the topographic and bathymetric surveys of the emerged and submerged beach and with the measurement of the current profiles, waves spectrum and turbidity in the Bosa bay.*

The analysis and processing of the data collected were useful for studying the morphodynamic and the evolutionary trends of the beach after the realization of the project.

Introduzione

Il presente lavoro espone le esperienze condotte ed i risultati raggiunti nell'ambito delle attività di monitoraggio ambientale *ante* e *post-operam* dell'intervento "Consolidamento dei versanti e messa in sicurezza dei tratti stradale e ferroviario tra Bosa Marina e Turas", richiesto dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Sardegna (ARPAS) ed eseguito nella rada di Bosa (Figura 1), nell'intervallo temporale di circa 2 anni, tra settembre 2015 e ottobre 2017.

Il monitoraggio è stato condotto con lo scopo di controllare gli effetti generati dall'esecuzione delle opere marittime previste, comprendenti in particolare il rifiorimento

della scogliera aderente, posta a protezione della strada litoranea Bosa-Turas e la rimozione di un pennello in blocchi lapidei dalla parte mediana dell'arco sabbioso di spiaggia, realizzato intorno alla metà del secolo scorso e conosciuto con il nome di "Su Pinnellu".

La campagna di acquisizione dati è stata condotta con lo scopo di misurare i parametri correntometrici, ondametrici e torbidimetrici dello specchio acqueo, oltre all'assetto morfo-topografico della spiaggia emersa e sommersa, compresa la variazione della linea di riva durante l'arco temporale stabilito. In questi termini il monitoraggio è stato finalizzato alla valutazione delle variazioni morfodinamiche indotte dagli interventi previsti ed alla stima delle tendenze evolutive del compendio sabbioso della rada di Bosa.



Figura 1 – Inquadramento dell'area interessata dal monitoraggio ambientale - *Territorial framework of the area affected by environmental monitoring*

Materiali e metodi

Il monitoraggio si è sviluppato nell'arco di tre intervalli temporali:

- 1) *ante-operam*, comprendente l'intervallo tra il 25 settembre 2015 e il 25 aprile 2016, con un'interruzione nel periodo 1 dicembre 2015 – 18 febbraio 2016, per cause procedurali e tecnico-amministrative legate alle autorizzazioni del progetto;
- 2) *in-operam*, compreso tra il 26 aprile 2016 e il 15 giugno 2016;
- 3) *post-operam*, tra il 16 giugno 2016 e il 20 ottobre 2017.

Il monitoraggio delle dinamiche meteomarine è stato condotto con la registrazione in continuo dei parametri correntometrici, ondametrici e torbidimetrici mediante la strumentazione installata sul fondale a circa 5 m di profondità, in un punto mediano dell'arco sabbioso emerso (Figura 1).

I rilievi morfo-topografici del settore emerso e sommerso hanno interessato l'intera falcata sabbiosa e lo specchio acqueo antistante di circa 30 ha, fino alla profondità di 12 m circa e sono stati ripetuti stagionalmente nei periodi autunnale e invernale.

Le attività di monitoraggio sono quindi state strutturate in relazione a tre ambiti tematici: assetto morfologico della spiaggia emersa, della spiaggia sommersa e dinamiche meteomarine del paraggio. Di seguito, per ciascuno dei tre ambiti, sono descritte le procedure metodologiche e le strumentazioni adottate.

Monitoraggio della spiaggia emersa

Il rilievo morfo-topografico è stato eseguito con un ricevitore satellitare GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Trimble R6 5800, in modalità RTK (*Real Time Kinematic*) fisso (*fixed*). La modalità RTK *fixed* è una tecnica di misura GPS cinematica con correzione differenziale in tempo reale, ottenuta, nel caso in questione, tramite comunicazione via radio-modem dei ricevitori con la rete di stazioni permanenti della Sardegna SARNET. La conversione delle quote ellissoidiche in quote geoidiche sul livello medio del mare è stata eseguita mediante il software IGM VERTO 3K ed il grigliato IGM dell'area di interesse nel formato *.GK2.

Il rilievo topografico ha interessato la spiaggia emersa e il settore della scogliera oggetto di intervento ed è stato condotto mediante profili equidistanti circa 50 m lungo il litorale. La linea di riva della spiaggia è stata rilevata con brevi transetti lungo la battigia, con interasse ogni 20 m circa, acquisendo le quote negative e positive rispetto al livello medio del mare. In questi termini, i transetti sono stati estesi fino alla batimetrica -0,5 m circa, ciò al fine di interpolare le quote del rilievo batimetrico e determinare la linea di riva rispetto al livello medio del mare.

Il rilievo topografico è stato integrato da tecniche indirette di fotointerpretazione della linea di riva dalle ortofoto storiche dell'area (periodo 1954 - 2013), analizzando la variazione storica della linea di costa tramite l'estensione DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) di ESRI ArcGIS Desktop sviluppata dall'USGS [1], generando transetti ortogonali rispetto a una *baseline* e calcolando i tassi di variazione dell'erosione/avanzamento [2] (Figura 2).

I dati sono stati acquisiti nel sistema di coordinate piane WGS84-UTM-32 Nord.

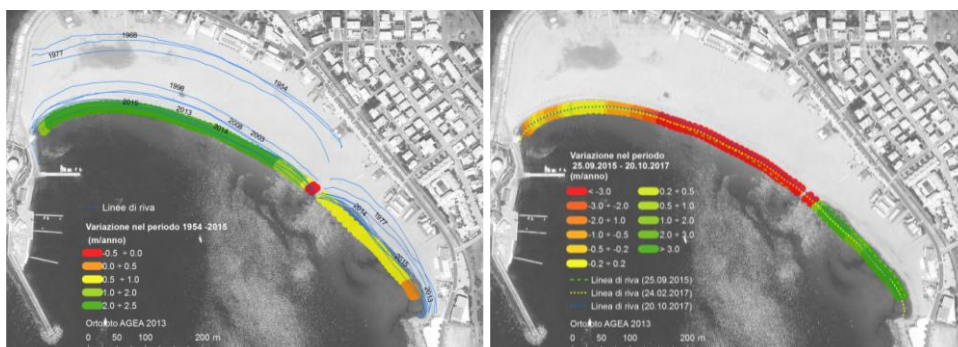


Figura 2 – Variazione della linea di riva (m/anno) nel periodo 1954/2015 (a sinistra) e nel periodo 25.09.2015 / 20.10.2017 - *Change of the shore line (m/year) in the period 1954/2015 (left) and in the period 25.09.2015 / 20.10.2017 (right)*

Monitoraggio della spiaggia sommersa

Il rilievo batimetrico è stato condotto con tecnologia a singolo fascio (*Single Beam*), interfacciato con sistema GPS operante con metodologia RTK *fixed*. Allo scopo è sono stati utilizzati i seguenti strumenti:

- un ecografo idrografico *single beam* Odom Echotrac CVM, equipaggiato di un trasduttore doppia frequenza (30kHz /200 kHz);
- un sistema GPS GNSS Trimble R6 5800 in modalità RTK *fixed*, appoggiato per la correzione differenziale alla rete di stazioni permanenti della Sardegna SARNET;
- un *laptop rugged* dotato del software di navigazione, acquisizione e processing dei dati Teledyne PDS 2000, il quale permette di interfacciare gli strumenti e visualizzare in tempo reale le *runlines* teoriche lungo cui acquisire i dati batimetrici.

Il rilievo è stato eseguito con un natante pneumatico di 4,30 m equipaggiato con un motore fuoribordo capace di navigare in prossimità della riva e quindi a profondità estremamente ridotte (Figura 3).

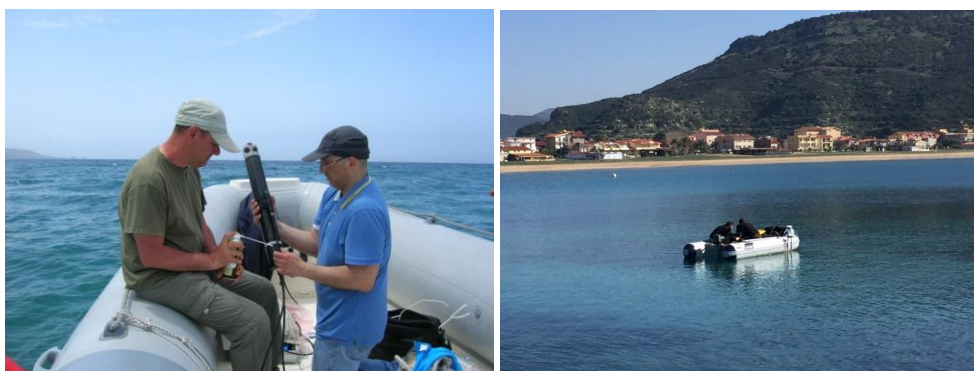


Figura 3 – Installazione del Nortek *Current Profiler* ed esecuzione dei rilievi batimetrici - *Installation of the Nortek Current Profiler and bathymetric surveys*

Il rilievo batimetrico, condotto in condizioni meteo-climatiche ottimali ad una velocità costante non superiore a 3 nodi, è stato eseguito su allineamenti (*runlines*) equidistanti 50 metri circa e perpendicolari alla costa, con linee di controllo parallele alla costa ed equidistanza di circa 100 m, corrispondenti alle batimetriche circa -3,0 m e -5,0 m.

Nella fase di *post-processing* i dati acquisiti sono stati sottoposti a procedure di verifica e validazione mediante l'eliminazione dei valori anomali (*spikes*), derivati da disturbi nella ricezione del segnale o da turbolenze lungo la colonna d'acqua e le correzioni di marea, adottando la Stazione Mareografica di Porto Torres (SS) come mareografo di riferimento. I dati sono stati infine sottoposti ad interpolazione per ottenere il Modello Digitale di Elevazione (DEM) del fondale e le curve isobatimetriche con equidistanza pari a 1 m, utilizzati successivamente per le elaborazioni spaziali dei volumi sedimentari movimentati nei diversi intervalli temporali (Figura 5).

Monitoraggio delle dinamiche meteomarine

I monitoraggi correntometrici ed ondametrici sono stati realizzati tramite il sensore Nortek Aquadopp *Current Profiler Right Head Angle*, basato sul principio *Acoustic Doppler Profiler* e calibrato per l'esecuzione di rilievi su basso fondale. Le principali caratteristiche del sensore riguardano: la frequenza acustica pari ad 1 MHz e il metodo PUV per la stima dei dati ondametrici, basato sulla misura della pressione dinamica (P) e delle velocità orbitali (U e V) delle onde (Figura 4).

Il monitoraggio della torbidità è stato realizzato mediante il sensore Campbell OBS3+, configurato e calibrato per un intervallo di valori compreso tra 0 NTU e 250 NTU. Il torbidimetro è stato collegato direttamente al correntometro/ondametro mediante un cavo di poliuretano con connettore *wet-pluggable*.

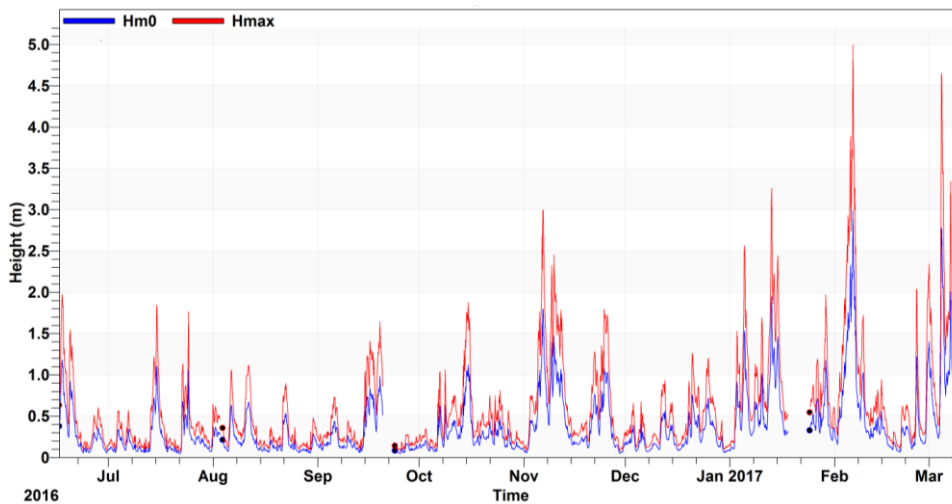


Figura 4 – Spettro dell'altezza significativa dell'onda (Hm0) e altezza massima (Hmax) - *Spectrum of Significant Wave Height (Hm0) and Maximum Wave Height (Hmax)*

Tutta la strumentazione è stata posizionata a circa 5,3 m di profondità su fondale sabbioso, ad una distanza di circa 160 m dalla riva, dopo la calibrazione dei sensori interni di pressione atmosferica e di orientamento. Il profilo della corrente sulla colonna d'acqua è stato rilevato in 9 celle di altezza 0,5 m a partire da circa 1,0 m dal fondo. Mentre la dimensione della cella usata per la costruzione dello spettro delle velocità dell'onda è pari a circa 2,00 m. La frequenza di campionamento è stata di 3 ore, con durata della singola misurazione di 60 s. I *log data* sono stati acquisiti circa ogni 40 giorni e sono stati processati, validati ed analizzati mediante i software dedicati Nortek AquaPro, Nortek Storm e il software di analisi statistica R.

Risultati e analisi interpretativa

I risultati ottenuti, per quanto rappresentativi di un intervallo temporale relativamente breve, ai fini di una valutazione quantitativa della tendenza evolutiva del paraggio costiero nel lungo e medio periodo, hanno comunque consentito di acquisire validi elementi conoscitivi, utili per la comprensione degli effetti indotti dagli interventi eseguiti sul sistema sabbioso emerso e sommerso. Inoltre, partendo dal confronto ragionato tra le serie temporali dei dati acquisiti e quelli pregressi, quali l'evoluzione della linea di riva, derivata da tecniche indirette di telerilevamento [3], è stato possibile approfondire le conoscenze sulla dinamica marino-costiera della rada di Bosa e stimare i volumi sedimentari in gioco, specie in riferimento agli assetti stagionali della spiaggia.

Nel periodo 1954-2015 l'analisi diacronica delle foto aeree rileva un avanzamento della linea di riva di circa 2 m/anno nel settore occidentale, compreso tra la Torre Aragonese e il vecchio pennello, nel punto mediano dell'arco di spiaggia. Il settore sud-orientale della falcata sabbiosa, nel medesimo intervallo temporale, manifesta un avanzamento dell'ordine di $0,3 \div 1$ m/anno, indicando quindi una discontinuità evolutiva tra i due settori di spiaggia.

Il periodo di osservazione compreso tra giugno 2016 e ottobre 2017, immediatamente successivo alla rimozione del pennello, indica un marcato cambiamento nella tendenza evolutiva della spiaggia rispetto all'arco temporale 1954-2015. In particolare, si osserva una stabilizzazione o addirittura un debole arretramento della linea di riva nella settore nord-occidentale, mentre la falcata sabbiosa sud-orientale è caratterizzata da un avanzamento significativo, variabile tra i 6,5 m e i 15 m, quindi con un accrescimento medio di circa 9,5 m. Il settore interessato dalla rimozione di "Su Pinnellu" manifesta invece variazioni significative, con un arretramento della linea di riva dell'ordine dei 3 m, dovuto alla rettificazione spontanea dell'arcata sabbiosa, per la rimozione del manufatto.

Valutando complessivamente il periodo di osservazione tra settembre 2015 e ottobre 2017, prevale la dinamica sopra descritta, con una inversione di tendenza rispetto a quanto rilevato nel periodo storico, mostrando nel settore nord-occidentale un'estensione ed amplificazione del fenomeno dell'arretramento nel periodo 02/2017-10/2017 e confermando nel settore sud-orientale il processo di avanzamento della linea di riva, variabile tra i 3 m e gli 11 m, con un accrescimento medio di circa 7,5 m.

Le variazioni della linea di riva dell'intera baia sabbiosa, nel complesso, identificano comunque una generale stabilità o un minimo deficit sedimentario dell'avanspiaggia, con una perdita di volume stimata in -1.500 m³ circa, nell'intervallo

temporale compreso tra settembre 2015 e ottobre 2017. Tuttavia, le variazioni della linea di riva e della spiaggia emersa, valutate congiuntamente ai dati batimetrici rilevati nel medesimo periodo, consentono di definire che il lieve deficit sedimentario del settore emerso è largamente compensato da un significativo incremento dello *stock* sedimentario (superiore a 100.000 m³) nel settore sommerso (Figura 5), confermando che il paraggio in questione sia alimentato da fonti esterne che ricadono nell'unità fisiografica di appartenenza.

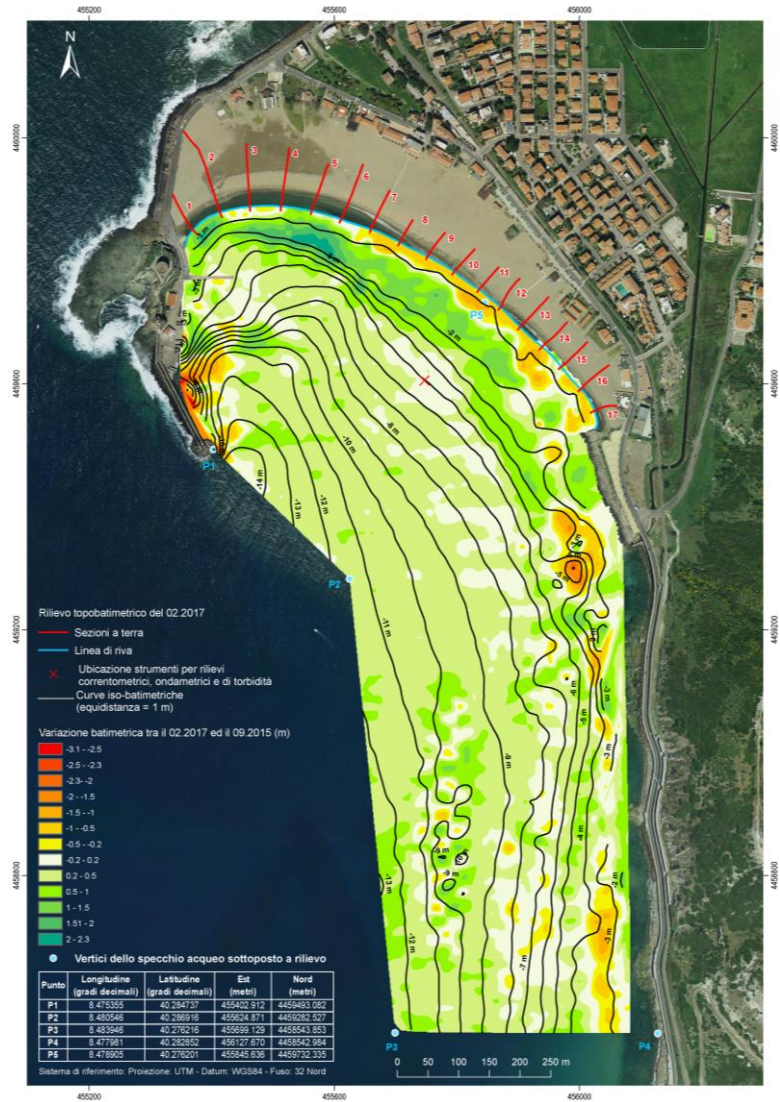


Figura 5 – Tavola delle batimetrie e variazioni tra settembre 2015 e febbraio 2017 - *Bathymetric map and changes between September 2015 and February 2017*

Conclusioni

Le serie temporali correntometriche ed ondamiche *ante, in e post-operam* hanno permesso l'analisi comparata delle dinamiche meteomarine in relazione alle diverse configurazioni del litorale, prima degli interventi e successivamente ad essi. Inoltre i rilievi topografici e batimetrici, ripetuti stagionalmente nel periodo di monitoraggio, hanno contribuito a comprendere le dinamiche evolutive dell'arco sabbioso e dei flussi correntometrici del paraggio, in particolare a seguito della rimozione di "Su Pinnellu".

L'analisi e l'elaborazione dei dati acquisiti, in particolare confrontando i risultati *ante-operam* rispetto a quelli *post-operam*, ha consentito di sviluppare le seguenti considerazioni conclusive:

- il paraggio oggetto di indagine manifesta un incremento volumetrico significativo dello *stock* sedimentario soprattutto nel settore sommerso e in particolare *Foreshore* e *Nearshore* (il cui limite inferiore è intorno alla batimetrica -4,0 m);

- gli incrementi volumetrici del settore marino sommerso hanno origini esterne alla baia e producono uno *stock* sedimentario significativo che confermerebbe la tendenza evolutiva della linea di riva all'avanzamento, anche se con una progressione più lenta rispetto al passato, ma omogeneamente distribuita lungo l'intero arco sabbioso (diversamente dal periodo storico precedente, quando il settore nord-occidentale manifestava un accrescimento più veloce rispetto al settore sud-orientale);

- significativi cambiamenti nella configurazione planimetrica dell'arco di spiaggia, sono determinati dallo spontaneo adattamento stagionale e dal riequilibrio morfologico sedimentario della spiaggia a seguito della riattivazione della corrente di deriva litoranea per la rimozione di *Su Pinnellu*, con prevalenza da nord-ovest verso sud-est nel periodo di osservazione;

- la propagazione del moto ondoso all'interno della baia, durante le mareggiate di Maestrale, è fortemente condizionata dai fenomeni di rifrazione e diffrazione delle onde a largo ad opera del molo foraneo;

- la dinamica correntometrica della baia è dominata dal moto ondoso proveniente dai quadranti occidentali, con incidenze più significative in termini di frequenze e altezze d'onda provenienti da 230°-240° N, che hanno manifestato altezze significative d'onda talvolta superiori a 3 m e picchi massimi di 5 m;

- i flussi correntometrici lungo la colonna d'acqua sono quasi esclusivamente imputabili ai fenomeni meteomarini spontanei, ad eccezione delle correnti di fondo trasversali (*rip current*) nel settore mediano della spiaggia, che erano indotti dalla presenza del pennello e che hanno avuto un significativo decremento in termini di frequenza e intensità a seguito della sua demolizione e rimozione.

Bibliografia

- [1] Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan - *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278 (July 2017).
- [2] Thieler, E.R., and Danforth, W.W. - *Historical shoreline mapping (I): improving*

techniques and reducing positioning errors, Journal of Coastal Research (1994) 10(3), 549 – 563.

- [3] Thieler, E.R., and Danforth, W.W. - *Historical shoreline mapping (II): application of the Digital Shoreline Mapping and Analysis Systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico*, Journal of Coastal Research (1994) 10 (3), 600-620.